SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©SCIEPRO/SHUTTERSTOCK - ARTANDBOAM/SHUTTERSTOCK
- AIRD RABBO/SIPA - KU LEUVEN/ROB STEVENS

MAL DE DOS
Les chaussures coupables
p.64

L'origine du temps

La dernière théorie de Stephen Hawking
décryptée par son disciple Thomas Hertog
p.28

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 920 - OCTOBRE - L'ORIGINE DU TEMPS

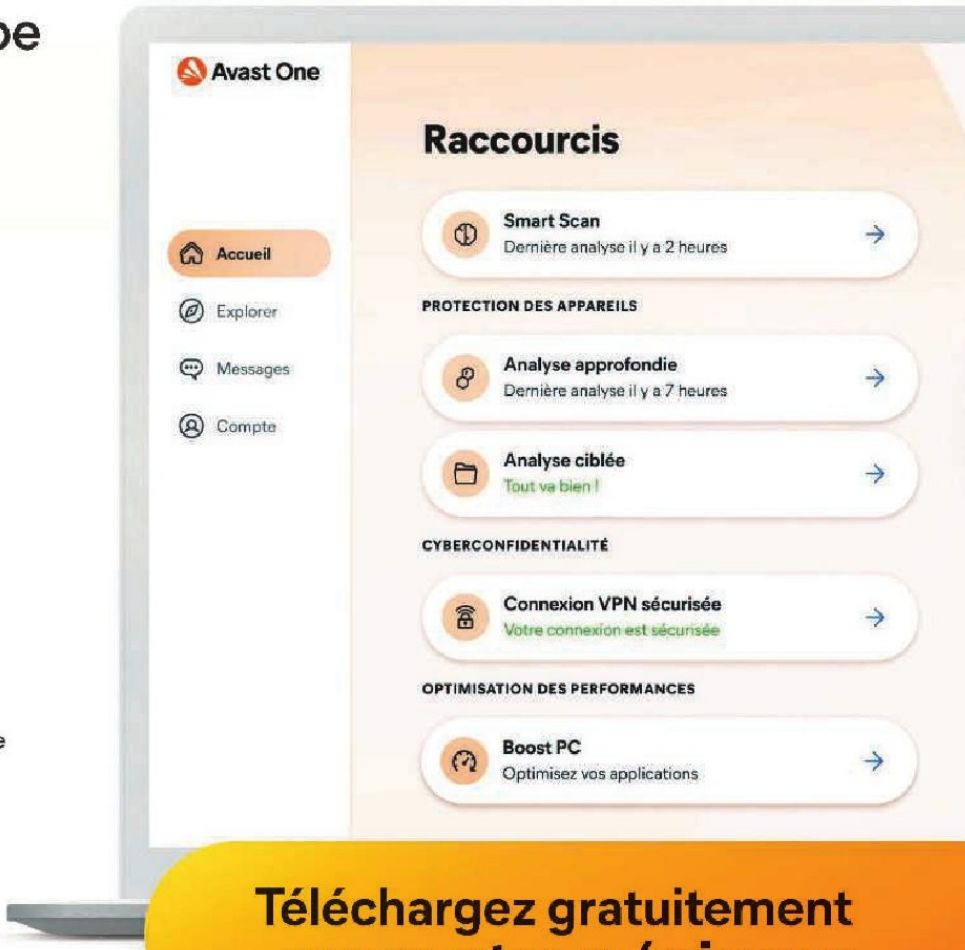
OCTOBRE 2023 - N° 920 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 960 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 920 - F: 5,30 € - RD

Bien plus qu'un simple antivirus

Avast One regroupe protection, confidentialité et performances.

- Bloquez virus, malwares, logiciels espions et ransomwares
- Sécurisez vos achats et transactions bancaires sur Internet
- Recevez une alerte en cas de piratage de vos comptes web
- Protégez-vous des attaques par phishing et des sites d'arnaques
- Sécurisez votre connexion et protégez votre argent avec un VPN
- Dissimulez votre position géographique
- Masquez votre adresse IP pour une confidentialité 24h/24 et 7j/7
- Accélérez, nettoyez et optimisez vos appareils



Téléchargez gratuitement sur avast.com/sciences

N'oubliez pas de protéger votre smartphone.
Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

presse citron
Meilleur antivirus
★★★★★

01NET
Suite hyper complète
★★★★

PC EDITORS' CHOICE
Choix de la rédaction
★★★★½

Avast One

© 2022 Copyright Avast Software

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

BERNARD MARTINEZ

Innover pour protéger l'océan

C'est tout un monde invisible à sauver qui commence d'apparaître aujourd'hui. Bien plus près que les étoiles du fin fond de l'Univers scruté par le télescope James-Webb, c'est ici sur notre propre planète et pourtant si loin de notre connaissance : voici les étonnantes images venues du cœur de l'océan. Comme nos fidèles internautes ont pu en découvrir l'annonce début septembre sur le site de *Sciences et Avenir*, l'institut français Ifremer propose désormais de sonder ces profondeurs sous-marines. Et ce *« depuis son canapé »*, avons-nous commenté avec quelque humour.

Espions des océans. A déjà été évoquée cette façon de coopérer qu'on nomme sciences participatives. Avec la plateforme « Espions des océans », tout un chacun se voit confier la tâche d'annoter les images remontées des profondeurs par de multiples engins, en reconnaissant les animaux qui s'y cachent. Voici les exploratrices et explorateurs terrestres incités à plonger sur de multiples écosystèmes, les côtes, les récifs coralliens, dans les grands fonds…

400 millions d'années. Ce n'est pas seulement l'aide aux scientifiques, indubitable, qui se joue là, mais la rencontre que nous, humains, dont les ancêtres sont sortis des eaux il y a environ 400 millions d'années, pouvons faire aujourd'hui avec l'océan. Un signe de cet engouement ? D'un amour nouveau pour lui ? Vous avez été nombreux à lire cet été notre numéro spécial « L'océan expliqué par les meilleurs scientifiques », toujours en vente.

Festival Grand Océan. Il y est rappelé notre conviction que l'humanité doit garder un océan vivant, il y va de sa survie. Reste à toujours mieux connaître ce géant, qui couvre 70 % de la surface de la planète, donc multiplier intelligemment les observations. Et aussi les partager. C'est ce que *Sciences et Avenir–La Recherche* a décidé de (re)faire, lors d'une deuxième édition du festival Grand Océan, à la Cité de la mer, à Cherbourg-en-Cotentin, les 29 et 30 septembre.

Vision depuis l'espace. Les meilleur(e)s scientifiques, une fois encore, doivent aider à comprendre les enjeux d'une réelle protection de l'océan. Et quelles innovations y contribuent. Les spécialistes démontrent la qualité des satellites et des sondes interplanétaires qui scrutent les océans depuis l'espace. Et racontent ce qu'ils nous disent du nôtre, du Pacifique à l'Atlantique en passant par l'océan Indien, Austral, Arctique… tout comme des eaux mystérieuses qui se cachent sur les satellites de Jupiter et Saturne.

Décarbonation du transport maritime. Il faut beaucoup de capteurs et de l'analyse intelligente pour suivre l'évolution de la température des eaux, conditionnant non seulement le vivant dans l'océan terrestre, mais aussi la régulation du climat global. Pour lutter contre son dérèglement, décarboner deviendra-t-il un objet majeur pour les armateurs, le transport maritime représentant 90 % du commerce mondial ? Innover pour transformer les navires. Vite, ça chauffe. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« La centrale solaire spatiale sort de l'ombre »

(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 919, septembre 2023

Dans votre article sur l'utilisation de panneaux solaires dans l'espace, il est écrit que le Soleil transforme chaque seconde 619 millions de tonnes d'hydrogène en hélium. Ne croyez-vous pas qu'à ce rythme-là, il aura consommé tout son hydrogène dans quelques années ?

Jean-Marie Devriendt

S. et A. : La puissance rayonnée par le Soleil atteint plus de 386 millions de milliards de milliards de watts, résultat de la transformation de 619 millions de tonnes d'hydrogène en 614,7 millions de tonnes d'hélium chaque seconde. Notre étoile est une naine jaune qui avait au départ une réserve d'hydrogène lui autorisant une espérance de vie d'environ 10 milliards d'années. Alors qu'elle est aujourd'hui agée de 4,6 milliards d'années, il lui reste assez de réserve pour briller pendant environ cinq milliards d'années. Lorsque ses réserves d'hydrogène viendront à manquer, son noyau d'hélium créé par la fusion de l'hydrogène va s'effondrer sur lui-même.

Eaux usées

Après la lecture de votre dossier très complet sur l'eau (*S. et A.* n° 917-918), je m'interroge sur l'utilisation des eaux usées pour arroser les cultures. Sachant que les résidus médicamenteux ne sont pas éliminés par les stations d'épuration et que cela « conduit » à influer sur le changement de sexe des poissons, qu'en sera-t-il pour les animaux vivant dans les sols ?

Daniel Étienne

S. et A. : Il y a des études en cours, mais nous n'avons pas encore les réponses à cette question de la permanence des molécules dans les eaux usées. On sait qu'il en reste, puisqu'elles font partie des listes européennes de polluants à rechercher, mais on ne sait pas ce qu'elles deviennent dans les sols, bien que des boues de stations d'épuration soient épandues dans les champs agricoles depuis des décennies. De fait, dans les retours d'expérimentations sur la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation, la question de l'impact sur la faune n'est jamais évoquée.

Superbatterie... en verre

J'ai été interloqué à la lecture de l'article sur les révolutions du verre (*S. et A.* n° 919), qui nous dit qu'un chercheur japonais a mis au point une batterie pour voitures électriques permettant une autonomie de 1600 kilomètres pour 60 secondes de recharge ! Si cela est possible, pourquoi continue-t-on à fabriquer des batteries lithium-ion, aux performances ridicules en comparaison ?

Christophe Lacoudre

S. et A. : La batterie mise au point par le chercheur Hironobu Minowa, de NTT, citée en exemple dans cet article, est bien évidemment un prototype. La phase de développement industriel économiquement viable n'est sans doute pas pour tout de suite ! Il s'agit néanmoins d'une piste de recherche intéressante. Pour le moment, il va donc falloir se contenter des batteries lithium-ion...

Précisions

Reproduction. Dans l'infographie sur « Les deux formes de reproduction asexuée » (*S. et A.* n° 919, p. 47), le schéma est mal légendé : la première cellule représentée n'est pas la cellule mère, mais le produit de la première des deux divisions de méiose. Par ailleurs, seuls 3 corps polaires auraient dû être représentés : l'un fusionne avec la grande cellule reproductrice et les deux autres dégénèrent. Enfin, la dernière cellule aurait dû contenir 4 chromosomes à une chromatide et non pas 2 chromosomes à 2 chromatides.

Pression. Une erreur s'est glissée dans l'encadré « De l'eau à 660 km de profondeur » (*S. et A.* n° 917-978, p. 36) : la pression n'y est pas de 23,5 millions, mais de 23,5 milliards de pascals (GPa).

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Géniales intuitions

Voici le dernier message, en guise de testament, que Stephen Hawking adressa à son disciple Thomas Hertog: *« Il est temps d'écrire un nouveau livre. »* Le cosmologiste belge, aujourd'hui âgé de 48 ans, aura côtoyé le génial astrophysicien britannique pendant vingt ans. Il fut d'abord son étudiant le temps d'une thèse de doctorat au Royaume-Uni, puis continua d'échanger lors de rencontres régulières à Cambridge ou à Louvain (Belgique). Ensemble, ils ont bâti une théorie qui les a conduits à repenser toute la cosmologie. Une nouvelle réponse à la question fondamentale « D'où venons-nous? ». À l'origine, une intuition: le présent conditionne le passé! Et le fait que l'humain observe l'Univers tout en l'habitant n'est pas sans effet sur sa nature actuelle. *« Les intuitions de Stephen Hawking ne sont pas à prendre à la légère »*, aime à rappeler Vincent Vennin du laboratoire de physique de l'École normale supérieure. Aussi, ce changement radical de vision demandait à être développé. Ce fut le grand projet commun de « H & H » que Thomas Hertog dut poursuivre seul après le décès de son confrère en 2018. Aujourd'hui, leur théorie de la « cosmologie descendante » est mûre pour être confrontée aux critiques de la communauté scientifique et soumise aux expérimentations. Pour bien en comprendre les subtilités et les implications, Thomas Hertog a ouvert à *Sciences et Avenir* les portes de l'Université catholique de Louvain où il travaille, et nous a livré les coulisses de son cheminement intellectuel. Un témoignage exceptionnel pour comprendre des concepts pour le moins déroutants qui font intervenir une évolution darwinienne de la physique.

> « Un témoignage exceptionnel pour comprendre des concepts pour le moins déroutants qui font intervenir une évolution darwinienne de la physique »

L'autre grande enquête que nous vous proposons ce mois-ci invite à repenser complètement une autre origine: celle du mal de dos *(p. 64)*. L'explosion de cas depuis un demi-siècle pourrait être liée à une modification radicale dans la manière de se chausser, avec l'adoption de chaussures aux semelles épaisses qui aggravent un mal qu'elles sont censées soigner. Les études s'accumulent au point qu'il était temps de sonner l'alerte. Bonne lecture! ■ @mathieu_nowak

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, A. CARLIEZ, N. GUTIERREZ C., M. DE LATAILLADE, M. PARRA , M. DA PONTE
1re secrétaire de rédaction Sandrine RAGÉGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Mélanie HENOU - mhenou@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

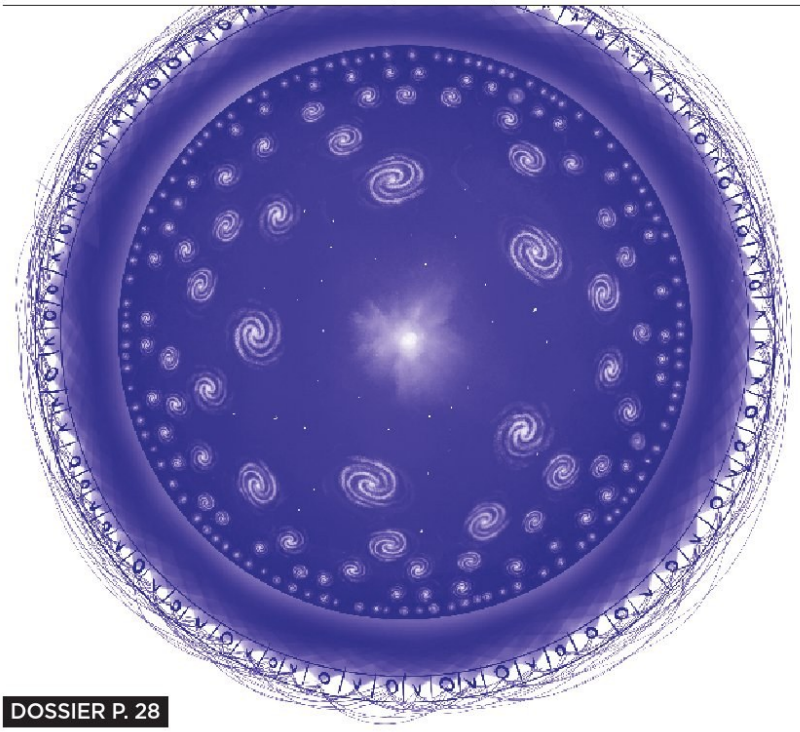
Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetée sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés, un encart « Montre Swiss Spirit-Sophia Boutique » et un encart «TV Câble Sat » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

edf
Devenons l'énergie qui change tout.
UNE BORNE DE RECHARGE, C'EST DES ÉCONOMIES MÊME EN ALIGNANT LES BORNES.
Installer une borne de recharge pour véhicule électrique, c'est faire un plein 3 à 4 fois moins cher* qu'avec un carburant thermique.
edf.fr/solutionshabitat
RCS PARIS 552 081 317
L'énergie est notre avenir, économisons-la !
* Source R&D, EDF, mai 2023. Hors coût d'installation d'une borne. Sur la base de consommation moyenne d'une voiture citadine à essence (6 L/100 km), d'un prix de l'essence à 1,9 €/L et d'un prix de l'électricité en heures creuses de 0,1615 €/kWh.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 920 / Octobre 2023



DOSSIER P. 28

L'origine du temps : le legs de Hawking

Le grand astrophysicien britannique décédé en 2018 travaillait à l'élaboration d'une nouvelle théorie expliquant les premiers instants de l'Univers avec son plus proche collaborateur, Thomas Hertog. Celui-ci nous entraîne dans les arcanes de cette cosmologie « darwinienne ».

P. 54

Lithium : le grand défi des batteries européennes

Alors que les ressources minières en lithium en France attirent les convoitises, certains entrepreneurs tentent de développer des techniques moins polluantes. Tour d'horizon.

P. 64

Mal de dos : la faute aux chaussures

De nombreuses études montrent l'impact négatif des chaussures modernes sur la santé, des dispositifs qui contrarient le fonctionnement naturel des pieds. Explications.

P. 78

Les secrets de la chamane de Bad Dürrenberg

L'étonnante sépulture mise au jour en 1934 en Allemagne a été réexaminée à l'aide des technologies les plus récentes : la femme qui y repose depuis 9000 ans serait une chamane.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** L'Inde décroche le pôle sud de la Lune / Une étoile au magnétisme incomparable

44 **Encelade, nouvel eldorado de la recherche d'une vie extraterrestre**

50 **L'empreinte carbone, face cachée de l'IA**

NATURE

12 **ACTUALITÉS** Les eaux radioactives de Fukushima vont à la mer / Du plastique biodégradable qui fait mouche

54 **Lithium : l'immense défi des batteries européennes**

60 **Une plongée éclairante au cœur des abysses**

SANTÉ

16 **ACTUALITÉS** Des neuroprothèses font parler le cerveau / Les lunettes anti-lumière bleue ne servent à rien

64 **Mal de dos : la faute aux chaussures**

72 **Le cheval, un allié thérapeutique face à l'AVC**

76 **Nutrition : le retour des céréales d'antan**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Le scribe était philosophe / La mégafaune californienne décimée par le feu

78 **Chamane de Bad Dürrenberg : les secrets d'une tombe exceptionnelle**

83 **L'héritage artistique révélé de l'empire carolingien**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

93 **Le ciel d'octobre**

94 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Solutions des jeux**

98 **Jeux**

THOMAS HERTOG - MATTHIEU COLIN/ HEMIS.FR - SHUTTERSTOCK - LDA SACHSEN-ANHALT, KAROL SCHAUER

L'atterrisseur Vikram photographié par l'une des caméras du rover Pragyan au cours de leur première mission d'une journée lunaire, équivalente à deux semaines terrestres. ◄

ISRO/THOMAS APPÉRÉ

L'Inde décroche le pôle sud de la Lune

Après seulement deux semaines d'activité, la mission Chandrayaan-3 a déjà recueilli des informations essentielles pour les futurs programmes de bases lunaires.

Succès historique pour l'Inde : le 23 août, l'alunissage réussi de sa mission Chandrayaan-3 près du pôle sud de notre satellite contrastait avec le cuisant échec russe de Luna-25 deux jours plus tôt. Surtout, à l'heure où fleurissent les projets de base lunaire, l'atterrisseur indien Vikram et son rover Pragyan qui composent la mission ont recueilli, lors de leurs deux premières semaines d'activité, des informations essentielles pour leurs futurs habitants. Les premières mesures de l'ionosphère lunaire — une couche de plasma chargé électriquement de 100 kilomètres d'épaisseur près du pôle sud — montrent qu'elle est composée d'un mélange clairsemé d'ions et d'électrons. La densité du plasma, qui semble varier à mesure que le jour lunaire avance, est d'environ 5 à 30 millions d'électrons par mètre cube. En comparaison, sur Terre, la densité maximale de la couche ionisée de l'atmosphère est d'un million d'électrons par cm^3. Une donnée importante pour de futurs systèmes de communication et de navigation : plus la densité électronique est élevée, plus les signaux radio mettent du temps à traverser l'ionosphère. Le plasma lunaire clairsemé ne devrait donc pas poser de problème de transmission.

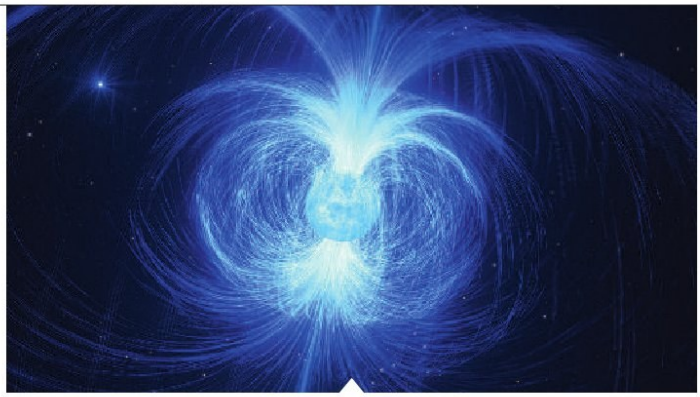
Autre apport de la mission Chandrayaan-3 : les futurs architectes de bases lunaires disposent désormais de nouvelles informations sur la température du sol sélène, qui pourrait servir un jour de matériau de construction. La sonde de l'atterrisseur montre que la température de jour à 8 cm de profondeur est d'environ 60 °C inférieure à celle de la surface. Les capteurs de la mission ont par ailleurs enregistré des températures de surface supérieures à –10 °C, nettement plus élevées que celles enregistrées par de précédentes missions.

Du soufre détecté pour la première fois

À la surface, le rover a relevé sur son parcours la présence d'aluminium, de silicium, de calcium, de fer… et de soufre ! Une surprise pour cet élément volatil qui pourrait être le vestige du passé de notre satellite, initialement recouvert d'une épaisse couche de roche en fusion, qui se serait cristallisée en refroidissant. À moins que ce composé ne provienne des astéroïdes qui bombardent régulièrement la surface de la Lune. Un tel phénomène pourrait d'ailleurs expliquer le petit épisode sismique de quatre secondes enregistré par le sismographe de l'atterrisseur. Mais cela pourrait aussi être un petit tremblement de Lune provoqué par un ajustement tectonique local lié aux forces de marée exercées notamment par la Terre sur la Lune. Après cette première journée de travail, Vikram et Pragyan ont eu le droit à un repos bien mérité durant les deux semaines suivantes de nuit lunaire. ■ **S. R.**

Une étoile au magnétisme incomparable

HD 45166 est l'étoile massive la plus magnétique jamais observée.



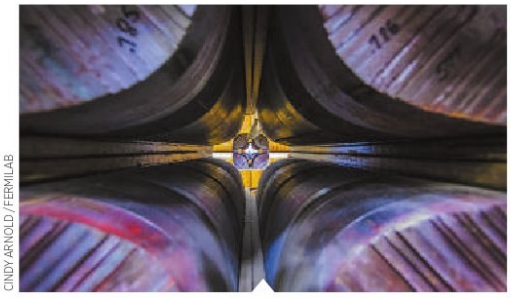
ESO/L. CALÇADA

L'astre pourrait devenir à sa mort le plus grand aimant de l'Univers (vue d'artiste).

Le champ magnétique de l'étoile HD 45166 est estimé à 43 000 gauss, des dizaines de milliers de fois plus que le Soleil, selon une équipe d'astronomes de l'université d'Amsterdam (Pays-Bas). Leurs observations ont été réalisées à l'aide d'un instrument du télescope Canada-France-Hawaii capable de détecter et de mesurer les champs magnétiques. L'astre, de deux fois la masse du Soleil, est connu depuis une centaine d'années en raison de son comportement qui ne correspond pas aux modèles classiques d'évolution d'étoile. Selon les chercheurs, cela s'explique donc par l'intense champ magnétique qui l'entoure et perturbe son rayonnement. Cette étoile en fin de vie devrait s'effondrer sur elle-même pour former un magnétar, une étoile à neutrons dotée d'un champ magnétique plus élevé encore. Elle est donc en passe de constituer l'un des aimants les plus puissants de l'Univers. **F. N.**

EN DEUX MOTS

CHIMIE Des ingénieurs sud-coréens ont mis au point un système olfactif artificiel capable de suivre en continu la détérioration des aliments. **TRANSPORTS** Tesla doit répondre aux premiers procès qui lui sont intentés pour deux accidents mortels survenus en 2019 mettant en cause sa fonction Autopilot. **GALAXIES** Une immense « bulle de galaxies » d'un milliard d'années-lumière de diamètre, possible structure fossile des débuts de l'Univers, a été découverte par des astronomes de l'université d'Hawaii (États-Unis).



CINDY ARNOLD / FERMILAB

Vue du quadri-aimant du Fermilab (États-Unis).

L'anomalie du muon confirmée

PHYSIQUE Le muon, particule 200 fois plus massive que l'électron, possède bien un moment magnétique ne cadrant pas avec les prédictions du modèle standard. Ce nouveau résultat obtenu au Fermilab (États-Unis) confirme celui de 2021, avec deux fois plus de précision. Ce serait une révolution si la théorie n'avait pas aussi évolué. En effet, cette valeur du moment magnétique serait compatible avec un modèle publié aussi en 2021. **F. N.**

SOURCE : DAVID AGUILLARD, FERMILAB, ÉTATS-UNIS.

Vénus abriterait encore de l'eau

PLANÉTOLOGIE **Un nouveau modèle permettant de simuler les atmosphères planétaires révèle que Vénus pourrait avoir conservé dans ses entrailles une grande fraction des réserves d'eau qu'elle a incorporées au moment de sa formation. Jusqu'ici, on pensait que la température de surface (460 °C) de cette jumelle de la Terre rendait la présence d'eau impossible.** **J. I.**

SOURCE : FRANCK SELSIS, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, FRANCE.

De la poussière cosmique sur le toit des cathédrales

EXOGÉOLOGIE Des micrométéorites ont été récupérées sur le toit de la cathédrale de Canterbury, au Royaume-Uni *(photo)*. Plus de 5000 tonnes de ces particules submillimétriques tombent sur notre planète chaque année. Elles sont recueillies habituellement en Antarctique où elles sont facilement repérables. Mais les toitures des édifices religieux anciens sont aussi des zones de collecte privilégiées, car elles ont des surfaces planes peu accessibles où la matière a pu s'accumuler pendant plusieurs siècles. Une douzaine d'autres cathédrales britanniques devraient être exploitées. **F. D.**

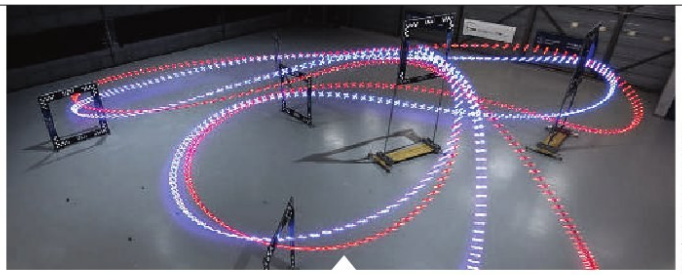
DR PENELOPE WOZNIAKIEWICZ

SOURCE : PENNY WOZNIAKIEWICZ, UNIVERSITÉ DU KENT, ROYAUME-UNI.

Un isotope rare de l'oxygène synthétisé

PHYSIQUE Une équipe japonaise est parvenue à synthétiser de l'oxygène-28, un noyau qualifié par les physiciens de doublement magique car il contient 8 protons et 20 neutrons, ce qui lui confère en théorie une grande stabilité. Or, il ne vit que 10^{-22} seconde environ… De quoi douter que les 20 neutrons assurent bien une grande stabilité. **F. N.**

SOURCE : Y. KONDO, TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JAPON



UZH / LEONARD BAUERSFELD

Les engins ont atteint les 100 km/h sur un circuit de 75 mètres.

Une IA surclasse des champions de course de drone

INFORMATIQUE Pour la première fois, un drone autonome a battu trois pilotes humains lors d'une épreuve de course de drones sur un circuit de 75 mètres. L'intelligence artificielle Swift présentée dans *Nature* ne s'est appuyée que sur les capteurs du quadricoptère. Son secret repose sur une technique d'apprentissage par apprentissage profond, qui lui a permis de tester des millions de trajectoires avant la course. L'équivalent d'un mois de travail condensé en une heure sur un simple ordinateur de bureau. **H. J.** sciav.fr/920drone

SOURCE : ELIA KAUFMANN, UNIVERSITÉ DE ZURICH, SUISSE.

22
Le nombre d'astronautes suffisant pour coloniser Mars

EXPLORATION Selon de nouvelles simulations informatiques, 22 colons suffiraient à assurer les tâches essentielles pour se maintenir sur Mars pendant 28 ans. À condition que le groupe soit constitué de personnalités classées « agréables » ou « sociables ». **F. D.**

SOURCE : JEAN-MARC SALOTTI, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, FRANCE

NASA

À VOIR SUR LE NET

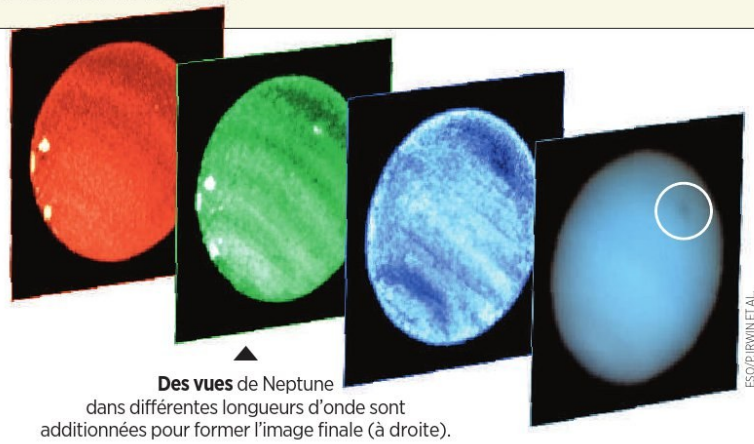
Tests réussis pour la mini-fusée martienne

ESPACE Les réacteurs conçus pour la mission Mars Sample Return sont opérationnels, selon les tests effectués en Californie (États-Unis). Ce sont eux qui équiperont la petite fusée Mars Ascent Vehicule — 3 m de long et 450 kg. Ce sera la première à décoller d'une autre planète. Objectif : rapporter sur Terre des échantillons de la planète Rouge au début des années 2030. Une mission complexe à découvrir en vidéo. **F. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Les taches de Neptune se dévoilent

Grâce au Very Large Telescope, des astronomes ont pu imaginer des hypothèses sur l'origine de ce phénomène.



ESO/P. IRWIN ET AL.

Des vues de Neptune dans différentes longueurs d'onde sont additionnées pour former l'image finale (à droite).

Pour la première fois, une équipe d'astronomes a pu observer, grâce au Very Large Telescope du Chili et l'instrument Muse, une tache découverte en 2018 à la surface de Neptune, et faire des hypothèses sur son origine. Sa spectaculaire atmosphère bleutée est en effet marquée par de grandes taches sombres éphémères dont l'origine restait mystérieuse. Et pour cause : l'observation de la géante gazeuse, à 4,5 milliards de kilomètres du Soleil, est difficile depuis la Terre. Mais en analysant la lumière réfléchie par la zone obscurcie, ils ont découvert qu'une couche profonde de l'atmosphère absorbait des longueurs d'onde du domaine visible, ce qui entraîne un assombrissement de la zone. Cela pourrait être dû à la transformation du sulfure d'hydrogène en un composé opaque sous l'effet des rayons du Soleil qui brisent les molécules. Et cela, bien que Neptune soit si loin de notre étoile. **F. N.**

Jusqu'où peut-on aller

lorsque l'on est bien accompagné ?

Imaginer, construire, réaliser, avancer…
La vie est faite d'inspirations,
d'envies et d'objectifs à atteindre.
Nos conseillers et nos experts
vous accompagnent pour anticiper
et préparer vos projets aujourd'hui
et leur permettre de se concrétiser demain.

Prenez rendez-vous avec un conseiller sur hsbc.fr

HSBC

HSBC Continental Europe – Société anonyme au capital de 1 062 332 775 euros – SIREN 775 670 284 RCS Paris. Siège social : 38 avenue Kléber 75116 Paris. Banque et intermédiaire en assurance immatriculé auprès de l'ORIAS (Organisme pour le Registre des Intermédiaires en Assurance – orias.fr) sous le n° 07 005 894. Crédit photo : Getty Images.

TAKUYA MATSUMOTO / THE YOMIURI SHIMBUN / AFP

Le site nucléaire japonais le 24 août, premier jour d'un rejet qui devrait durer au moins trente ans.

Les eaux radioactives de Fukushima vont à la mer

Ces rejets sont devenus indispensables car la centrale nucléaire accidentée est saturée de réservoirs d'eau issue du refroidissement des cœurs fondus.

Envisagé depuis des années, le rejet d'eaux radioactives dans l'océan Pacifique au large de la centrale nucléaire accidentée de Fukushima Daiichi (Japon) a commencé le 24 août. Il devrait se poursuivre durant une trentaine d'années. Cette eau est principalement issue de l'arrosage continu, depuis 2011, des trois cœurs fondus pour assurer leur refroidissement. Ce sont plus de 1,3 million de mètres cubes d'eau qui sont stockés dans plus de 1000 réservoirs. Le site, qui doit accueillir chaque jour 100 m^3 d'eau supplémentaires, est saturé et les premiers réservoirs présentent des faiblesses. Sans compter le danger qu'ils représentent dans une zone sismique et exposée à des typhons. Après avoir envisagé diverses solutions, l'exploitant de la centrale Tepco a opté pour le rejet en mer, avec l'aval de l'Agence internationale de l'énergie atomique qui en surveille la mise en œuvre. L'eau rejetée a été traitée par le procédé ALPS qui permet de ramener la concentration en dessous des normes autorisées de 62 des 64 radionucléides qu'elle contient. Mais pas le carbone 14 ni le tritium (un isotope de l'hydrogène). Si bien que l'eau doit encore être diluée plus de 100 fois avant le relargage.

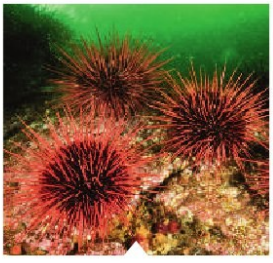
Des pêcheurs portent plainte

Le rejet d'eau tritiée se pratique souvent dans l'industrie nucléaire. Selon Tepco, la quantité de radioactivité rejetée sera moitié moindre que pendant l'exploitation de la centrale (22 contre 50 térabecquerels par an). Les États voisins du Japon, à commencer par la Chine, redoutent néanmoins que l'eau contaminée ait des effets inconnus dans l'environnement. Le tritium, qui émet des rayonnements ionisants, pourrait s'accumuler tout au long de la chaîne alimentaire. Les premiers prélèvements, au lendemain du premier rejet, se seraient révélés inférieurs au plafond fixé par le Japon à 1500 becquerels par litre, soit un septième des recommandations maximales de l'OMS pour l'eau potable. La Chine n'en a pas moins suspendu toutes les importations de produits de la mer japonais et des pêcheurs locaux ont porté plainte contre l'État nippon. ■ **M. N.**

Pourquoi les oursins glissent de leur rocher

ZOOLOGIE Les pluies torrentielles favorisées par le dérèglement climatique risquent de mettre en péril les populations d'oursins. En effet, en diminuant la salinité de leur milieu, le déversement de grandes quantités d'eau douce affecte la capacité de ces échinodermes à se fixer aux rochers. Alors qu'ils sont essentiels au contrôle des populations d'algues qui permet aux coraux de prospérer, ces herbivores glissent et risquent ainsi la mort. **M. P.**

SOURCE : ANDREW MOURA, UNIVERSITÉ VILLANOVA, ÉTATS-UNIS.



P. KOBEH / NATUREPL / EBPHOTO

« Strongylocentrotus franciscanus » fixés au récif.

ELLE A DIT

« Personne ne s'attendait à voir un jour un beignet de décharges électriques de 280 km de diamètre »

Alexa Van Eaton, volcanologue à l'Institut d'études géologiques des États-Unis, qui révèle dans une étude que l'éruption du Hunga Tonga en janvier 2022 a provoqué un orage volcanique record, rythmé par 2600 éclairs par minute à son apogée, pour un total d'environ 200 000 décharges en 11 heures.

Du plastique biodégradable qui fait mouche

Un procédé inédit permet d'extraire un polymère de la famille des glucides à partir de cadavres de diptères.

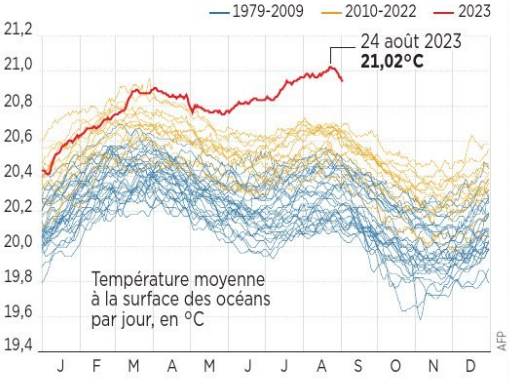
Les mouches soldats noires (*Hermetia illucens*), élevées pour leurs asticots riches en protéines transformés en nourriture animale, pourraient aussi servir à fabriquer des plastiques biodégradables, démontrent des chimistes de l'université A&M du Texas (États-Unis). Le procédé qu'ils ont mis en point permet d'extraire et de purifier, à partir des cadavres de diptères, les molécules de chitine qu'ils contiennent — un polymère de la famille des glucides. Extirpées de certains groupes d'atomes, les chaînes moléculaires s'imbriquent alors pour former un hydrogel super-absorbant. Capable d'emmagasiner jusqu'à 47 fois son poids en eau en une minute, il pourrait être utilisé en agriculture pour piéger l'eau lors d'inondations et la relâcher en cas de sécheresse. Décomposée en ses constituants élémentaires, la chitine permettrait même de produire des polycarbonates et polyuréthanes sans recourir à la pétrochimie. **F. D.**

FRANCISCO JAVIER TORRENT ANDRES // BIOSPHOTO

Le corps de « Hermetia illucens » est composé de chitine, un polymère pouvant être transformé en un hydrogel super-absorbant.

EN DEUX MOTS

ALGUES Des chercheurs chinois ont mis au point une éponge en biochar — charbon obtenu par pyrolyse — très efficace pour éliminer les algues et cyanobactéries toxiques en évitant toute pollution secondaire. **NUCLÉAIRE** L'échantillonnage d'écailles de tortues révèle que leur carapace enregistre sur plusieurs décennies l'exposition à une contamination radioactive. **BIODIVERSITÉ** Une étude montre que le recyclage d'arbres fruitiers abattus permet de reconstituer efficacement des récifs indispensables à la biodiversité marine.



Envolée des températures océaniques en 2023

CLIMATOLOGIE Depuis le mois d'avril, la température moyenne de surface des océans s'est envolée à des niveaux inédits selon le service changement climatique de l'observatoire Copernicus, dépassant même le 24 août la barre symbolique des 21 °C. **H. J.**

SOURCE : C3S / ECMWF (ERA5), TEMPÉRATURE ENTRE LES PARALLÈLES 60°N ET 60°S.

À la recherche de la super-patate

AGRICULTURE Le super-pangénome de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*), qui réunit les séquences génomiques de près de 300 variétés de pommes de terre et d'espèces sauvages apparentées, a été publié. Les données vont être utilisées pour mettre au point, par croisement ou à l'aide de techniques d'édition du génome, un nouveau cultivar plus nutritif et plus résistant aux maladies et aux aléas climatiques. **J. I.**

SOURCE : ILAYDA BOZAN, UNIVERSITÉ MCGILL, CANADA.

Les chiens de traîneau rendent le Svalbard plus vert

ÉCOLOGIE L'analyse d'images satellite de l'archipel norvégien du Svalbard prises entre 1985 et 2021 révèle que le verdissement observé sur ces îles serait dû à l'engouement touristique pour les promenades en traîneau à chiens. L'augmentation du nombre de parcs à chiens conduit en effet à accroître la quantité d'excréments fertilisants les sols. Pas forcément une bonne nouvelle : les sols herbeux retiennent davantage la chaleur que les sols nus ou la neige, qui renvoie les rayonnements solaires. **M. P.**

SOURCE : ELISE GALLOIS, UNIVERSITÉ D'ÉDIMBOURG, ÉCOSSE.

GETTY IMAGES

Le succès des promenades à traîneau multiplie le nombre de chiens et d'excréments.

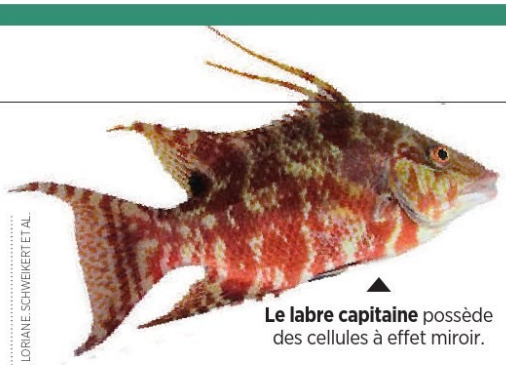
Les ours polaires identifiés par ADN environnemental

GÉNOMIQUE Le suivi des ours polaires, difficile sur la banquise, pourra désormais bénéficier de l'analyse d'ADN environnemental (ADNe). Une équipe annonce avoir réussi à récupérer ce matériel génétique invisible dans des empreintes de pattes laissées dans la neige. Outre l'espèce et le sexe des animaux, l'ADNe a permis d'identifier quels individus étaient passés par là. **H. J.**

SOURCE: LISETTE WAITS, UNIVERSITÉ DE L'IDAHO, ÉTATS-UNIS.

ANDREW L. VONDUYKEET AL.

Les empreintes conservent du matériel génétique.



LORIANE SCHWEIKERT ET AL.

Le labre capitaine possède des cellules à effet miroir.

Ce poisson se regarde grâce à ses écailles

ICHTYOLOGIE Si le labre capitaine (*Lachnolaimus maximus*) peut changer de couleur en quelques millisecondes, à la façon d'une pieuvre, c'est grâce à des cellules photoréceptrices très particulières. Non seulement celles-ci perçoivent l'environnement pour s'y adapter, mais elles possèdent aussi un effet miroir qui permet à ces poissons de récif de se voir eux-mêmes. **M. P.**

SOURCE: L. SCHWEIKERT, UNIVERSITÉ DE CAROLINE DU NORD, ÉTATS-UNIS.

Les tsunamis détectés dans l'atmosphère

Une nouvelle technique permet d'analyser les perturbations de masses d'air provoquées par ces puissantes vagues.

La prévention des tsunamis et des séismes sous-marins repose aujourd'hui sur des équipements spécifiques en mer. Mais une équipe propose une méthode originale, combinant intelligence artificielle (IA) et données satellite pour analyser les perturbations atmosphériques provoquées par ces événements. Les tsunamis déclenchent en effet des ondes de gravité internes qui perturbent la densité d'électrons dans l'ionosphère. Or, le trajet du signal radio entre un satellite de géolocalisation et une station réceptrice au sol peut témoigner de ces perturbations. Les scientifiques ont ainsi utilisé des signaux satellite correspondant à trois tsunamis majeurs pour entraîner un algorithme d'apprentissage profond à reconnaître ces perturbations. Pour tester leur méthode, ils ont ensuite soumis à leur IA des données satellite recueillies lors d'un autre tsunami survenu en 2015 au Chili : celui-ci était prédit avec une fiabilité de 91,7 %. Pas optimal, mais prometteur. **A. D.**

SPL/SUCRE SALÉ

Image satellite du tsunami touchant la côte sri-lankaise, à Kalutara, le 26 décembre 2004.

37 000 espèces envahissantes selon le premier rapport mondial

200 espèces
espèces exotiques envahissantes (EEE) végétales et animales supplémentaires observées tous les ans.

60 % des extinctions d'espèces
animales et végétales dues, en partie ou totalement, aux EEE.

390 milliards d'euros
Le coût annuel de ces invasions biologiques.

Ces chiffres sont issus de la première étude mondiale menée sur les espèces exotiques envahissantes par la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les écosystèmes (IPBES). **L. C.**

Des éoliennes qui évitent les oiseaux

TECHNOLOGIE Alors que tous les essais pour réduire la mortalité des oiseaux due aux éoliennes ont échoué — signaux sonores, lumières, peintures des pales — une équipe norvégienne propose un système s'adaptant au comportement des volatiles. À l'aide de caméras et de radars, il calcule leur trajectoire de vol pour déclencher un ajustement de la vitesse de rotation des pales permettant d'éviter la collision. **H. J.**

On n’imagine pas, mais il y a quelques instants vous n’aviez plus de connexion internet
On
toujours bien connecté
Panne de connexion internet.
Avec les engagements on, une Airbox de prêt vous attend dans la boutique de votre choix ou on vous offre 200 Go sur chaque mobile Orange de votre foyer (jusqu’à 5).
Quelle que soit votre offre.
Services et usages valables en métropole pour les clients particuliers pour les offres Open et Livebox, en cas de panne, après appel au service clients, ou diagnostic réalisé sur https://tester-depanner-vos-services.orange.fr ou depuis l’application Orange et moi, prêt d’une Airbox 4G (si la panne est estimée à plus de 24 h) ou crédit data de 200 Go offerts. Prêt d’une durée de 2 mois sous réserve de couverture sur réseaux Orange 3G/3G+/4G. Crédit data 200 Go : valable sur les forfaits mobile Orange, Sosh ou Let’s go avec mobiles compatibles. Frais de non-restitution de l’Airbox : 49 €. © Getty Images.
orange™

NOAH BERGER

Les ondes cérébrales d'Ann sont traduites par la machine en phrases qui sont ensuite lues par l'avatar sur l'écran.

Des neuroprothèses font parler le cerveau

Des interfaces cerveau-machine ont décodé l'activité électrique du cerveau de deux patientes privées de la parole pour restituer des phrases.

Deux nouvelles neuroprothèses ont permis de restaurer une forme d'expression verbale chez deux personnes dont l'élocution était affectée par une maladie neurodégénérative pour l'une, un accident vasculaire cérébral (AVC) pour l'autre. Présentées dans la revue *Nature* — la première par l'université Stanford, la seconde par l'université de Californie, aux États-Unis —, ces interfaces cerveau-machine (ICM) ont décodé l'activité électrique du cerveau des deux patientes pour restituer les phrases qu'elles souhaitaient prononcer, et ce à une vitesse s'approchant de celle de la parole : 62 mots/minute pour la première et 78 mots/min pour la seconde (*lire aussi* S. et A. *n° 910*).

« Pour ceux qui ne peuvent plus parler, cette technologie représente un outil considérable pour rester connecté au monde, peut-être continuer à travailler, entretenir des relations amicales et familiales », écrit Pat Bennett, 68 ans, dont la maladie de Charcot a paralysé les lèvres, la langue, le larynx et les mâchoires. Quatre petites électrodes ont été insérées dans le cortex cérébral de cette Américaine il y a un an. Et c'est une intelligence artificielle (IA) qui associe les signaux captés à l'un des 39 phonèmes composant la langue anglaise. L'IA teste les possibilités et corrige les phrases en fonction de leur sens, et de l'enchaînement probable des mots. *« Ce système est formé pour savoir quels mots doivent précéder les autres et quels phonèmes composent quels mots »*, précise Francis Willett, auteur de l'étude pour l'université Stanford.

Aider les paralysés à communiquer

Un protocole similaire a été utilisé pour traduire en mots l'activité neuronale de l'autre patiente, Ann. Mais les phrases étaient ensuite lues par une voix artificielle incarnée dans un avatar projeté sur un écran. Ces véritables prouesses neuroscientifiques demandent encore à être perfectionnées et testées chez plus de patients. *« Le dispositif n'est pas encore prêt pour équiper les personnes dans leur vie quotidienne,* prévient Francis Willett. *Mais c'est un grand progrès vers le rétablissement d'une communication rapide pour les personnes paralysées qui ne peuvent pas parler. »* ■ **M. P.**

JOSEL RAMÍREZ-GARCIALUNA ET AL.

La caméra hyperspectrale se clipse sur un smartphone.

Un dispositif de poche pour les plaies

E-SANTÉ Parce qu'il n'est pas toujours facile de savoir si une plaie est simplement enflammée ou alors infectée — relevant dans ce cas d'un traitement antibiotique rapide —, une équipe internationale a mis au point un dispositif de poche capable de faire la différence. Clipsable sur un smartphone, Swift Ray 1 combine une intelligence artificielle et des techniques d'optique, de thermographie et de fluorescence. **S. R.-M.**

SOURCE : GREGORY BERRY, UNIVERSITÉ MCGILL, ÉTATS-UNIS.

31 %

La part des hommes porteurs d'un papillomavirus

ÉPIDÉMIOLOGIE Alors qu'une campagne de vaccination débute en octobre dans les collèges de France, une étude montre qu'un tiers des hommes de plus de 15 ans dans le monde sont porteurs d'un papillomavirus. Un sur cinq véhicule une forme oncogène de ce virus, responsable de cancers de l'utérus, de l'anus, du pénis ou de la zone ORL. **C. L.**

BIODERMA
LABORATOIRE DERMATOLOGIQUE
&
institut Curie

PARTENAIRES DEPUIS **10 ANS**

VOTRE **EAU MICELLAIRE CRÉALINE H2O** SE RÉINVENTE POUR OCTOBRE ROSE.

Depuis 10 ans, Bioderma se mobilise auprès de l'Institut Curie pour accompagner les patientes atteintes du cancer.

Notre volonté commune ? **Leur offrir une meilleure qualité de vie** en apportant à ces femmes des solutions de prise en charge des effets secondaires cutanés liés à leur traitement. L'objectif : favoriser l'observance et leurs chances de guérison.

À l'occasion d'Octobre Rose, l'iconique eau micellaire Créaline H2O s'habille aux couleurs de la cause pour la soutenir. Toujours en prenant soin de **démaquiller et nettoyer en douceur toutes les peaux, même les plus sensibles.**

1€ PAR PRODUIT REVERSÉ
À L'**INSTITUT CURIE***
POUR SOUTENIR LA RECHERCHE CONTRE LE CANCER ET L'ACCOMPAGNEMENT DES PATIENTS.

UN GRAND MERCI À SCIENCES & AVENIR POUR SON SOUTIEN DANS NOTRE DÉMARCHE.

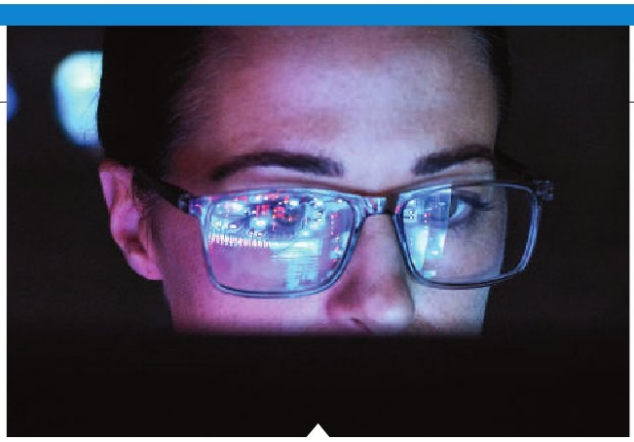
*Pour l'achat de cette édition limitée Créaline H2O 500 ml. Voir condition sur bioderma.fr

Un anticorps protège de la bronchiolite du nourrisson

PÉDIATRIE Depuis septembre, date du début de la campagne vaccinale de rentrée, tous les nouveau-nés de moins de 1 an peuvent bénéficier gratuitement, dès leur premier jour de vie, d'un anticorps monoclonal contre la bronchiolite du nourrisson. Le nirsevimab, commercialisé sous le nom de Beyfortus, est un traitement préventif contre le virus respiratoire syncytial (VRS) qui a démontré lors des essais une diminution de 83 % du nombre d'hospitalisations. Une dose unique, efficace pendant six mois, suffit. **S. R.-M.**

VOISIN/PHANIE

Le traitement préventif permet une diminution de 83 % du nombre d'hospitalisations.



ANDREW BROOKES / DEEPOL BY PLAINPICTURE

Les effets nocifs (sommeil, fatigue oculaire…) de la lumière bleue émise par les écrans n'ont toujours pas été prouvés.

Les lunettes anti-lumière bleue ne servent à rien

Les chercheurs vont même plus loin : aucun lien entre la lumière bleue et la fatigue oculaire n'a été identifié.

Souvent proposés chez les opticiens, les les verres traités pour filtrer la lumière bleue émise par les écrans ne serviraient à rien, selon la plus large étude menée à ce sujet. Publiée dans la revue de référence *Cochrane*, cette analyse a passé au crible 17 essais cliniques randomisés, réalisés dans six pays différents. *« Une seule étude montrait clairement qu'il n'y avait qu'un effet très léger voire pas d'effet du tout »*, note le Dr Laura Downie de l'université de Melbourne (Australie) qui a dirigé ces travaux. À dire vrai, la nocivité présumée de la lumière bleue émise par les écrans (télévision, smartphone, ordinateur) pour les yeux et la qualité du sommeil peine à être démontrée. *« Cette association reste controversée : aucun mécanisme biologique clair par lequel la lumière bleue pourrait causer directement une fatigue oculaire n'a été identifié »*, précise la chercheuse. **C. L.**

Une thérapie génique contre l'alcool

ADDICTOLOGIE Des essais conduits sur des macaques rhésus modèles pour l'alcoolisme ont montré qu'une forme de thérapie génique induisait une réinitialisation efficace du système de la récompense dans le cerveau. L'étude publiée dans *Nature Medicine* rapporte que la consommation des singes alcooliques avait chuté de plus de 90 % par rapport au groupe témoin. **H. J.**

SOURCE : MATTHEW FORD, UNIVERSITÉ SCIENCE ET SANTÉ D'OREGON, ÉTATS-UNIS.

Une protéine du lait accélère la cicatrisation

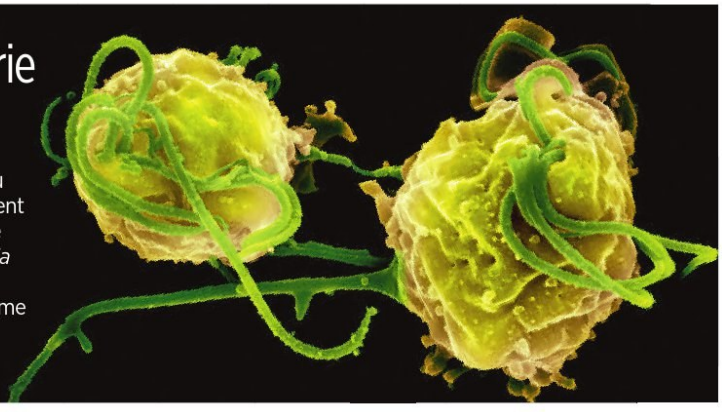
PHARMACOLOGIE **Une étude britannique démontre pour la première fois chez l'animal le pouvoir cicatrisant de la caséine, la principale protéine du lait de vache. Une réduction de la taille des plaies (95 %) est observée dans le groupe ayant eu des pansements caséinés. Cet ensemble de 200 acides aminés, bon marché et abondant, pourrait à terme remplacer les sels d'argent.** **S. R.-M.**

SOURCE : JUBAIR AHMED, UNIVERSITY COLLEGE DE LONDRES, ROYAUME-UNI.

Chez le moustique, une bactérie lutte contre le paludisme

INFECTIOLOGIE En étudiant des moustiques vecteurs du paludisme, une équipe s'est aperçue que certains portaient moins de parasites que d'autres. En cause ? Une bactérie naturelle identifiée dans leur microbiote intestinal : *Delftia tsuruhatensis*. Sans effet sur la survie des moustiques et intransmissible à l'humain, elle pourrait être utilisée comme outil de contrôle biologique du parasite. **A. C.**

SOURCE : WEI HUANG, UNIVERSITÉ JOHNS-HOPKINS, ÉTATS-UNIS.



DENNIS KUNKEL MICROSCOPY / SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ

RÊVER
À NOUVEAU
C'EST TOUT UN APPRENTISSAGE
Apprentis d'Auteuil aide chaque année près de 40 000 jeunes(1) en difficulté à bâtir leur avenir.
Soutenez-nous sur www.apprentis-auteuil.org
APPRENTIS D'AUTEUIL
La confiance peut sauver l'avenir
(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2022. Agence Marcel - © Yann Le Pape

CANAN DAGDEVIREN / MIT

Un échographe portable pour dépister le cancer du sein

CANCÉROLOGIE Pour améliorer la survie des patientes à haut risque de cancer du sein, des ingénieurs ont conçu un patch flexible à ultrasons pouvant se fixer à un soutien-gorge afin de sonder facilement les tissus mammaires entre deux examens de routine. Testé sur une patiente, le dispositif a pu détecter des nodules de seulement 0,3 centimètre, la taille d'une tumeur à un stade précoce. **H. J.** SOURCE : WENYA DU, MIT, ÉTATS-UNIS.

Une nouvelle base de données pour les gènes méconnus

GÉNÉTIQUE **« Unknome », de la fusion des mots anglais *unknown* (« inconnu ») et *genome* (ensemble des chromosomes et des gènes d'un individu), est le nom choisi par des scientifiques britanniques pour désigner une nouvelle base de données regroupant les gènes humains négligés par la recherche ; ceux qui, malgré leur présence dans notre ADN, demeurent largement méconnus. Une démarche présentée dans la revue *Plos Biology* vise à accélérer les progrès scientifiques et à lever le voile sur les mystères de la génétique. S. R.-M.**

Un rein humain dans un embryon de cochon

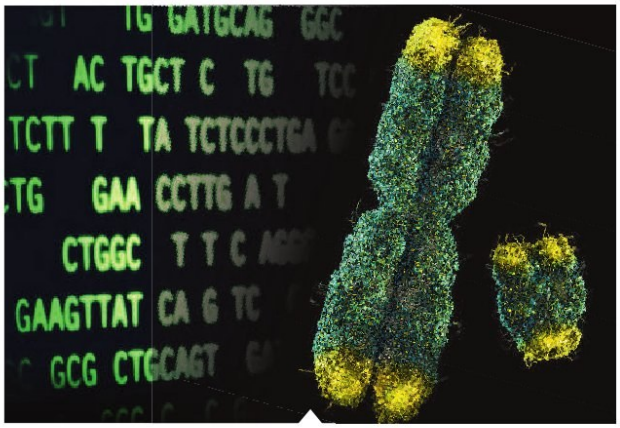
BIOLOGIE Avec l'objectif de faire pousser des organes humanisés chez des animaux pour pallier le manque de greffons, une équipe chinoise a réussi à faire pousser un rein composé majoritairement de cellules humaines dans un embryon de cochon. Les organes normalement formés étaient constitués jusqu'à 60 % de cellules humaines. Un pourcentage très supérieur à toutes les précédentes tentatives d'embryons chimères (*lire* S. et A. *n° 877*). **N. G. C.**

SOURCE : JIAOWEI WANG, ACADÉMIE DES SCIENCES CHINOISES, CHINE.

Le séquençage du génome humain est enfin complet

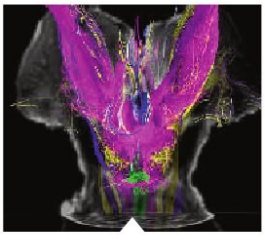
Le chromosome Y se dérobait jusqu'ici aux généticiens en raison de sa complexité.

Enfin ! Une équipe internationale d'une centaine de chercheurs, dirigée depuis l'université Johns-Hopkins aux États-Unis, a annoncé dans *Nature* avoir achevé le séquençage entier du chromosome Y humain. En effet, dans chacune de nos cellules se trouvent 24 chromosomes, dont deux chromosomes sexuels : XX chez les femmes et XY pour les hommes. Les 23 chromosomes avaient déjà été séquencés, mais le Y se dérobait encore aux généticiens. S'il est le plus petit du caryotype humain, il était de loin le plus compliqué à déchiffrer en raison de séquences très répétitives, pouvant se lire dans les deux sens comme des palindromes. Grâce à ces travaux, 41 nouveaux gènes ont déjà été identifiés, qui pourraient être impliqués dans la spermatogénèse, la fertilité masculine ou le risque de cancer. *« Pour l'instant, nous ne savons pas ce que ce nouveau génome peut nous révéler »*, précise Rajiv McCoy, coauteur de l'étude. **C. L.**



SCIENCE SOURCE / BSIP ET NH

L'ADN du chromosome mâle (à droite, vue d'artiste) est décodé à 100 %.



BRIAN L. EDLOW ET AL.

Vue de fibres nerveuses impliquées dans l'état de veille.

Des neurones de la conscience identifiés

NEUROSCIENCES **Une équipe a cartographié 18 groupes de neurones dans le cortex humain dont l'interconnexion est directement impliquée dans l'état de veille consciente. Ces résultats apportent un nouvel éclairage sur la connectivité du tronc cérébral au reste du cerveau, et ouvrent des perspectives pour le traitement du coma. H. J.**

SOURCE : BRIAN EDLOW, HARVARD MEDICAL SCHOOL, ÉTATS-UNIS.

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

fête de la Science

Du 6 au 16 octobre 2023 en France métropolitaine, et du 10 au 27 novembre en outre-mer et à l'international, se déroulera la 32e Fête de la science, organisée par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Un temps propice au dialogue entre la science, la recherche et la société, placé cette année sous le thème des liens entre le sport et les sciences.

Depuis sa création en 1991, la Fête de la science est devenue cette grande manifestation populaire et gratuite dont rêvait son fondateur, Hubert Curien, alors ministre de la Recherche et de l'Espace : pendant une dizaine de jours, familles, scolaires, étudiants, amateurs ou passionnés de sciences, chercheurs et enseignants se rencontrent et échangent à l'occasion de milliers d'événements gratuits, partout en France métropolitaine et ultra-marine.

La science à l'heure du sport

En cette période de Coupe du monde de rugby et, bientôt, de Jeux olympiques et paralympiques, la Fête de la science, ancrée depuis son origine dans l'actualité, traite cette année de tous liens qui unissent les sciences et le sport. Une thématique d'autant plus fédératrice que la pratique sportive bat des records : en France métropolitaine et ultramarine, on compte 26 millions de pratiquants, 14 millions de licenciés, 6000 athlètes de haut niveau ; près des deux tiers des Français, âgés de 15 ans et plus, disent s'adonner de manière régulière à une activité physique ou sportive au moins une fois par semaine[1].

Le sport, une thématique inclusive et « tout-terrain »

Questionner le sport sous l'angle scientifique, c'est traverser tous les champs disciplinaires de notre société : Les bénéfices du sport et de l'activité physique sur la santé, ses impacts économiques, sociologiques, écologiques, son histoire, son urbanisme, sa chimie et sa nutrition, les neurosciences, la biomécanique, la robotique et les sciences des matériaux, l'éthique sportive, la question du genre, les sciences de l'environnement et les pratiques durables... Une somme infinie de sujets et de problématiques, pour les champions et les championnes du sport et du handisport, pour ceux et celles qui rêvent de médailles et pour les autres, les amateurs et les curieux, quels que soient leur âge, leur couleur de peau, leur genre, leur orientation sexuelle, leurs atouts et leurs handicaps.

Pour retrouver toutes les manifestations en France métropolitaine ou dans les territoires d'Outre-mer et à l'international :
www.fetedelascience.fr

LA FÊTE DE LA SCIENCE EN CHIFFRES

Plus d'1 million de visiteurs
Plus de 300 000 scolaires
Près de 5000 événements sur tout le territoire
Durée moyenne de visite : 1h20

© Laurence Laborie

3 questions à Marine Lorphelin, médecin généraliste, auteure du livre « En Pleine Forme » aux éditions Marabout, marraine de la 32e édition de la Fête de la science.

« Une heure de sport le soir ne compense pas huit heures d'affilée sans se lever de son canapé ou de sa chaise. »

Pourquoi avoir accepté de marrainer la 32e édition de la Fête de la science ?
Déjà parce que j'étais honorée que l'on pense à moi. Et puis parce que je ne perds jamais une occasion de faire la promotion de l'activité physique : amélioration de la santé osseuse et musculaire, de la santé cardio-vasculaire, diminution de l'hypertension artérielle, des maladies coronaires et du risque d'AVC, meilleure digestion, meilleure régulation métabolique, rôle anticancer mais aussi meilleure gestion du stress, diminution de l'anxiété, prévention et amélioration de la dépression, des fonctions cognitives, du sommeil, développement de vertus positives, création de lien social... L'activité physique est l'un des piliers de notre santé et de notre bien-être. Je vais faire de mon mieux pour mobiliser le plus grand nombre à se déplacer, à la fois pour leur santé, mais aussi pour aller à la rencontre des professionnels, des chercheurs, des sportifs, des enseignants.

Quelle définition donneriez-vous à l'activité physique ?
L'activité physique concerne toute activité en mouvement qui engendre une dépense d'énergie : monter des escaliers, faire du jardinage, faire ses courses, et bien sûr, pratiquer une activité sportive. Faire la promotion de l'activité physique revient à promouvoir le mouvement au quotidien ; à l'opposé, la sédentarité réside dans l'absence de mouvement pendant plusieurs heures d'affilée : au-delà de 3 heures en position assise, chaque heure supplémentaire sans bouger est mauvais pour la santé. En fait, il faudrait ne jamais être sédentaire et toujours actif... même si, dans le cas de blessures, de maladies ou de handicap, cela peut sembler compliqué. Il existe aujourd'hui ce qu'on appelle l'activité physique adaptée (APA), encadrée par des coachs formés à la pathologie et au handicap ; ces coachs sont capables d'accompagner chacun vers une activité physique adaptée à son état de santé et à ses capacités.

En quoi fêter la science vous semble essentiel ?
La Fête de la science est un bel événement, gratuit, ouvert à tous, partout en France. Nous avons tant à apprendre de la recherche : elle est source de progrès, sur tous les plans, et indispensable si nous voulons réussir à relever les défis de notre monde actuel : des défis sur le plan sportif, mais aussi sur le plan environnemental et humain. La Fête de la science est une magnifique occasion d'éduquer les plus jeunes à l'importance des sciences, et qui sait, de créer des vocations pour un futur meilleur.

[1] **Rapport "Les chiffres clés du sport 2020", INJEP**

SERGIO CARRO, MUSEO BÍBLICO DE MALLORCA

La première partie du papyrus a été retrouvée au Musée biblique de Majorque (Espagne).

Le scribe était philosophe

De nouveaux fragments d'un papyrus égyptien ont permis de décrypter entièrement ce « Dialogue d'un désespéré avec son âme ».

« *Être ou ne pas être ?* » Près de 3500 ans avant Shakespeare, un scribe égyptien s'est posé cette question dans l'un des plus anciens textes philosophiques de l'histoire. Connu sous le nom de *P. Berlin 3024* ou, de façon plus poétique, *Dialogue d'un désespéré avec son âme*, le récit relate les états d'âme d'un mourant qui se demande s'il vaut mieux vivre en souffrant ou mourir. Si le papyrus compte parmi les plus célèbres conservés à ce jour dans un musée, les spécialistes ne l'ont pourtant jamais entièrement compris. Et pour cause : il a toujours manqué sa première partie, disparue. Celle-ci vient de refaire surface grâce au travail d'une jeune égyptologue de l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis, Maria Escolano-Poveda. En 2017, alors qu'elle étudie des fragments conservés au Musée biblique de Majorque (Espagne), elle comprend soudain que les signes calligraphiés sous ses yeux sont les mêmes que ceux de *P. Berlin 3024*.

L'homme était entre la vie et la mort

Assembler les pièces de ce puzzle n'avait pourtant rien d'évident. « *Les fragments sont très petits, il était donc très difficile de leur donner un sens. Mais plus tard, j'ai pu étudier* P. Berlin 3024 *directement à Berlin et confirmer cette identification* », a confié Maria Escolano-Poveda. Jusqu'ici, les égyptologues ignoraient pourquoi la conversation avait lieu. Ce que le fragment de Majorque explique enfin : « *Il s'agit d'un mourant. L'homme a cette conversation parce qu'il est entre la vie et la mort, dans une sorte de coma. Nous le savons désormais car ces fragments nous donnent un indice en l'appelant "le malade"*, détaille l'égyptologue. *Il s'agit tout de même d'un texte étrange, même en Égypte, puisqu'il offre une vision de la mort qui n'est pas celle que l'on trouve couramment dans la littérature funéraire.* » Aujourd'hui largement acceptées par la communauté égyptologique internationale, les conclusions de Maria Escolano-Poveda ont été intégrées pour la première fois cette année à une anthologie de la littérature égyptienne — celle publiée en français par l'égyptologue Bernard Mathieu. ■ **M. B.**

Le reptile qui se nourrissait comme une baleine

PALÉONTOLOGIE Deux fossiles de *Hupehsuchus nanchangensis,* reptile marin vieux de 249 millions d'années, ont été découverts en Chine. L'un d'eux comprend un crâne intact présentant des mâchoires dépourvues de dents ainsi que des rainures similaires à celles des baleines à fanons. La cavité buccale était extensible pour recevoir de grandes quantités d'eau. Des indices qui évoquent une alimentation par filtration dans un océan pauvre en ressources à l'époque. **J. I.**

SOURCE : ZI-CHEN FANG, UNIVERSITÉ DES GÉOSCIENCES DE CHINE

WUHAN CENTER OF CHINA GEOLOGICAL SURVEY

« Hupehsuchus nanchangensis » (vue d'artiste).

ELLE A DIT

« Il s'agit des baumes les plus riches et les plus complexes jamais identifiés pour cette période précoce »

Barbara Huber, archéologue à l'Institut Max-Planck de géoanthropologie (Allemagne), dont l'équipe est parvenue à reconstituer « l'odeur de l'éternité » grâce à de nouvelles techniques biomoléculaires. Ce mélange olfactif (cire d'abeille, huile végétale, graisses, bitume, résine de mélèze, pistachier…) a été utilisé pour la momification d'une jeune femme en Égypte il y a 3500 ans.

Croisière 100% Francophone

LES JOYAUX CACHÉS DES ÎLES GRECQUES

À BORD DU MS HAMBURG
DU 23 AVRIL AU 2 MAI 2024

Avec la participation exceptionnelle de

CLAUDE SINTES*

Archéologue, conservateur en chef honoraire du Patrimoine, ancien directeur du Musée départemental Arles antique, chercheur associé auprès du CNRS

Par cette croisière nous allons revivre le périple des Grecs de Lesbos, d'Amorgos, de Santorin..., quittant leurs îles sous le patronage d'Apollon de Délos, pour fonder villes et colonies autour de la Méditerranée jusqu'à Nikaïa (Nice) qui sera notre destination finale.

En empruntant le même sillage qu'eux, en visitant certains de leurs comptoirs et les plus merveilleux vestiges qu'ils nous ont laissés, en parlant de leurs dieux, c'est toute cette migration désormais mythique qui va resurgir.

De tout cela je vous parlerai au cours de cette croisière à laquelle j'aurai le plaisir de participer !

Claude Sintès

Pour son itinéraire, la qualité des intervenants et celle des prestations proposées cette croisière est recommandée par Marc SAUGIER, créateur des :

Croisières du SAVOIR SCIENCES AVENIR La Recherche

2 EXCURSIONS OFFERTES♦
POUR LES LECTEURS DE SCIENCES ET AVENIR

À partir de 2 490 € /pers. en cabine intérieure double

Vous retrouverez également à bord nos 3 conférenciers :

OKSANA GARIN*
Spécialiste en Histoire de l'Art, littérature, mythologie et religions

CHRISTINE DARMAGNAC*
Diplômée de l'école du Louvre, de l'Institut d'Art et d'Archéologie

CÉDRIC CABANNE*
Professeur d'histoire géographie, spécialiste en géopolitique

Pour tout renseignement, réservation et demande de brochure de **nos croisières culturelles** contactez

Plein Cap Croisières au **04 93 20 21 20** par courriel à **info@plein-cap.com** ou sur

www.plein-cap.com

PLEIN CAP CROISIÈRES

Une Expérience de plus de 35 ans dans le Maritime

Pour recevoir le programme détaillé merci de renvoyer ce coupon à
Plein Cap Croisières - 251 route de la Colle - 06270 Villeneuve-Loubet
ou ▶

Nom : . . . . . Prénom : . . . . .

Adresse : . . . . .

Code Postal : . . . . . Ville : . . . . .

Tél. : . . . . . Courriel : . . . . .

Conformément à la loi « Informatique et Liberté » du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre demande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification et de rectification des données vous concernant. Immatriculation IM006120053. Les Conditions Générales de Vente 2024 sont disponibles sur le site www.plein-cap.com ou se reporter à la brochure «L'appel du large 2024». Les conférenciers sont non contractuels, sous réserve de disponibilité. Crédits photos : shutterstock.com/imagIN.gr photography*
**Offre réservée aux nouveaux inscrits, non rétroactive.*

C. TOWNSEND / NATURAL HISTORY MUSEUM OF LOS ANGELES COUNTY

Il y a 12 900 ans, de grands incendies ont éradiqué les populations de grands mammifères, comme les bisons, dans le sud de la Californie, aux États-Unis (vue d'artiste).

La mégafaune californienne décimée par le feu

L'assèchement du climat et les activités humaines ont provoqué cette disparition au pléistocène.

Une série d'incendies a été la cause immédiate de l'extinction de nombreux grands mammifères dans le sud de la Californie (États-Unis) à la fin de la dernière période glaciaire, il y a 12 900 ans. C'est ce que révèle une étude publiée dans *Science* sur cette mégafaune du pléistocène, qui comprenait notamment le tigre à dents de sabre (*Smilodon fatalis*), le loup géant (*Aenocyon dirus*), le chameau occidental (*Camelops hesternus*), le bison antiquus, ou encore le paresseux géant. L'exploitation des données paléoclimatiques et de nouvelles datations sur 172 fossiles montrent que l'extinction de ces espèces est due à une synergie entre l'assèchement du climat et les activités humaines. La chasse aux grands herbivores a augmenté la présence d'herbes qui ont servi de combustible aux incendies. « *Cela a donné lieu à des incendies catastrophiques comme il n'en avait jamais existé* », indique Robin O'Keefe, premier auteur de ces travaux. **H. J.**

À Pompéi, la mort par asphyxie

ARCHÉOLOGIE La première analyse chimique des moulages de Pompéi montre que ceux qui ont cherché à fuir lors de la deuxième phase de l'éruption du Vésuve en l'an 79 sont morts asphyxiés par un flux de gaz avant d'être recouverts par les cendres. Une partie de la population avait déjà succombé lors de la phase principale de l'éruption. La plupart des victimes sont mortes enterrées dans les bâtiments, qui se sont effondrés sous une pluie de trois mètres de pierres ponces. **S. de L.**

SOURCE : LLORENÇ ALAPONT, UNIVERSITÉ DE VALENCE, ESPAGNE.

UNIVERSITY OF VALENCIA

Les victimes ont été piégées par le nuage de gaz et de cendres.

Un empereur chinois enterré avec un panda géant

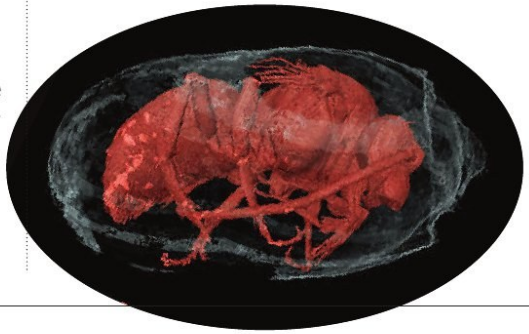
ARCHÉOLOGIE Des chercheurs affirment avoir découvert le premier squelette complet de panda géant dans la tombe de l'empereur Han Wendi (180 à 157 avant J.-C., dynastie Han) dans la ville de Xi'an, capitale de l'empire chinois durant treize dynasties. La présence de l'animal, qui met en lumière les rituels funéraires royaux de l'époque, était assurément le symbole d'un statut suprême. Il est probable qu'il ait été sacrifié. **M. B.**

SOURCE : HU SONGMEI, INSTITUT ARCHÉOLOGIQUE DU SHAANXI, CHINE

Des milliers d'abeilles momifiées découvertes au Portugal

PALÉOCLIMATOLOGIE **Sur la côte d'Odemira, au Portugal, des milliers d'abeilles de l'espèce *Eucera* ont été préservées dans leur cocon pendant près de 3000 ans. Un cas unique de momification naturelle survenu durant une période de refroidissement global du climat. L'étude aux rayons X des « momies » fournira des données précieuses sur le climat passé dans cette région.** **M. P.**

SOURCE : CARLO CARVALHO, UNIVERSITÉ DE LISBONNE, PORTUGAL



F. BERNARDINI/ICTP

◄ **« Eucera »** est restée préservée dans son cocon pendant près de 3000 ans.

Des poissons des profondeurs il y a 130 millions d'années

ÉVOLUTION Des travaux de recherche font état de preuves d'occupation des fonds marins par plusieurs espèces de poissons cartilagineux datant d'il y a 130 millions d'années. Soit 80 millions d'années plus tôt qu'on ne le pensait jusqu'à présent. Les fossiles consistent en des traces retrouvées sur des schistes en Italie, dans la chaîne des Appenins du Nord, entre le Piémont et la Ligurie, qui formait autrefois le fond abyssal de l'océan Téthys. **J. I.**

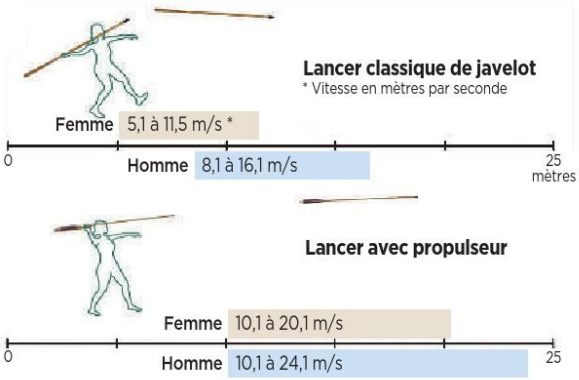
SOURCE : ANDREA BAUCON, UNIVERSITÉ DE PADOUE, ITALIE

Une chasse plus égalitaire grâce au propulseur

ARCHÉOLOGIE Alors qu'une différence de vélocité existait entre les hommes et les femmes pour le lancer de javelots préhistoriques, l'adoption du propulseur aurait permis d'égaliser leur efficacité respective. Des tests évaluant 2160 lancers au javelot seul ou avec propulseur et effectués par 108 personnes novices viennent accréditer l'hypothèse d'un rôle actif des femmes dans les activités de chasse. **H. J.**

SOURCE : MICHELLE BEBBER, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE KENT, ÉTATS-UNIS.

MICHELLER BEBBER ET AL.



Les dents préservent d'anciens anticorps

PALÉOPROTÉOMIQUE Une analyse inédite de dents médiévales vieilles de 800 ans montre que celles-ci ont conservé des anticorps produits par le système immunitaire en réponse à des infections virales ou bactériennes. Cette technique de paléoprotéomique (protéines anciennes) pourrait permettre d'étudier plus finement l'histoire des maladies infectieuses humaines. **H. J.**

SOURCE : BARRY SHAW, UNIVERSITÉ DE NOTTINGHAM, ROYAUME-UNI

MAXPPP

Réplique de la momie d'Ötzi exposée à Magdebourg (Allemagne) en 2020.

Le nouveau visage d'Ötzi

PALÉOGÉNOMIQUE Découvert momifié par la glace dans les Alpes italiennes en 1991, l'homme préhistorique Ötzi était sans doute presque chauve et possédait une pigmentation de la peau très foncée en raison de ses origines non pas steppiques, mais anatoliennes. C'est ce que révèlent de nouvelles analyses génétiques. Celles menées en 2012 se sont révélées contaminées par de l'ADN moderne. **S. de L.**

SOURCE : K. WANG, UNIVERSITÉ DE FUDAN, CHINE.

PROJET MYRRHA / SCK CEN - T. PALBERG, B. LIEBCHEN - WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE - AFP

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

NUCLÉAIRE

La transmutation renaît de ses cendres en Belgique

Au Centre d'étude de l'énergie nucléaire à Mol, en Belgique, des ingénieurs construisent un réacteur nucléaire, baptisé Myrrha, qui promet une transmutation des déchets à une échelle inédite, capable de réduire de plusieurs milliers d'années leur radiotoxicité. À lire sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/920nuc

SANTÉ

L'actualité du Covid-19

Alors que débute le quatrième automne depuis l'apparition du Sras-Cov-2, retrouvez toutes les informations importantes sur les nouveaux variants et les risques qu'ils peuvent poser. sciav.fr/Covid-19

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

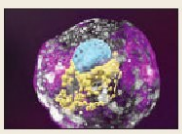
2 minutes

Des chercheurs ont réussi à écrire dans l'eau

Première ! En utilisant une microbille et une modification localisée du pH, des physiciens ont réussi à tracer des symboles dans le liquide. En vidéo : sciav.fr/920bille

5 minutes

Des embryons humains artificiels



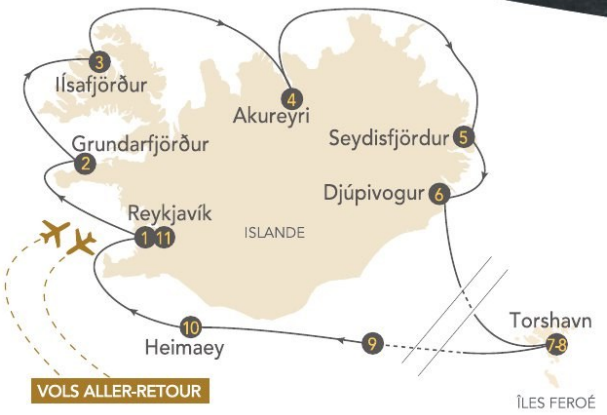
Trois équipes sont parvenues à cultiver en laboratoire des embryons humains artificiels à partir de cellules souches jusqu'au 14e jour de développement. sciav.fr/hanna

10 minutes

Rugby : quand les corps s'entrechoquent

À l'occasion de la Coupe du monde de rugby 2023, découvrez notre infographie vidéo sur les forces qui s'exercent sur le corps des rugbymen. sciav.fr/920rugby

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook



Partez à la découverte de l'Islande à bord de l'***Oceania Sirena*** en compagnie de notre équipe d'encadrement francophone et de nos conférenciers **Christian Genillard**, guide et chef d'expédition et **Sylvain Mahuzier**, guide naturaliste, qui donneront de passionnantes conférences.

*Prix incluant une remise de 400€/pers. pour toute réservation avant le 31 octobre 2023. CGV disponibles sur notre site.

Photos : ©Nick Fox / AdobeStock ©OceaniaCruises - Création graphique : OceanoGrafik.com

CROISIÈRE EN ISLANDE

par Voyages d'exception

DU 7 AU 14 JUILLET 2024

Dès **5 090 €**/pers.*

depuis Paris - pension complète

Réservations et informations

Demandez notre brochure détaillée au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@voyages-exception.fr**, sur **voyages-exception.fr/brochures** (code ISLSC à renseigner), ou contactez votre agence de voyages.

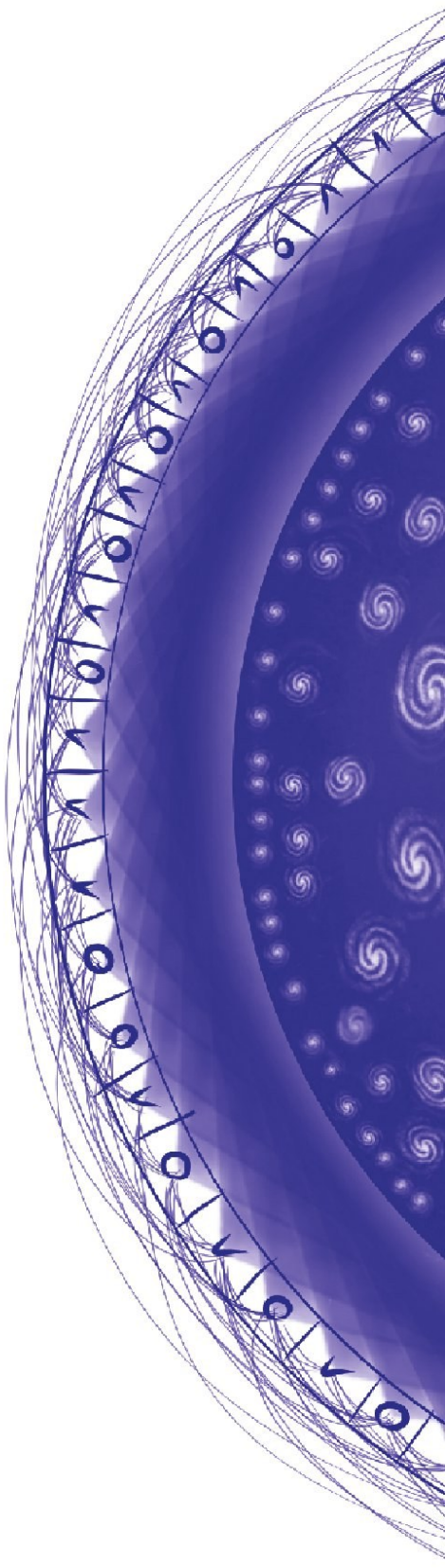
- CROISIÈRES FRANCOPHONES
- ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS
- CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

VOYAGES-EXCEPTION.FR

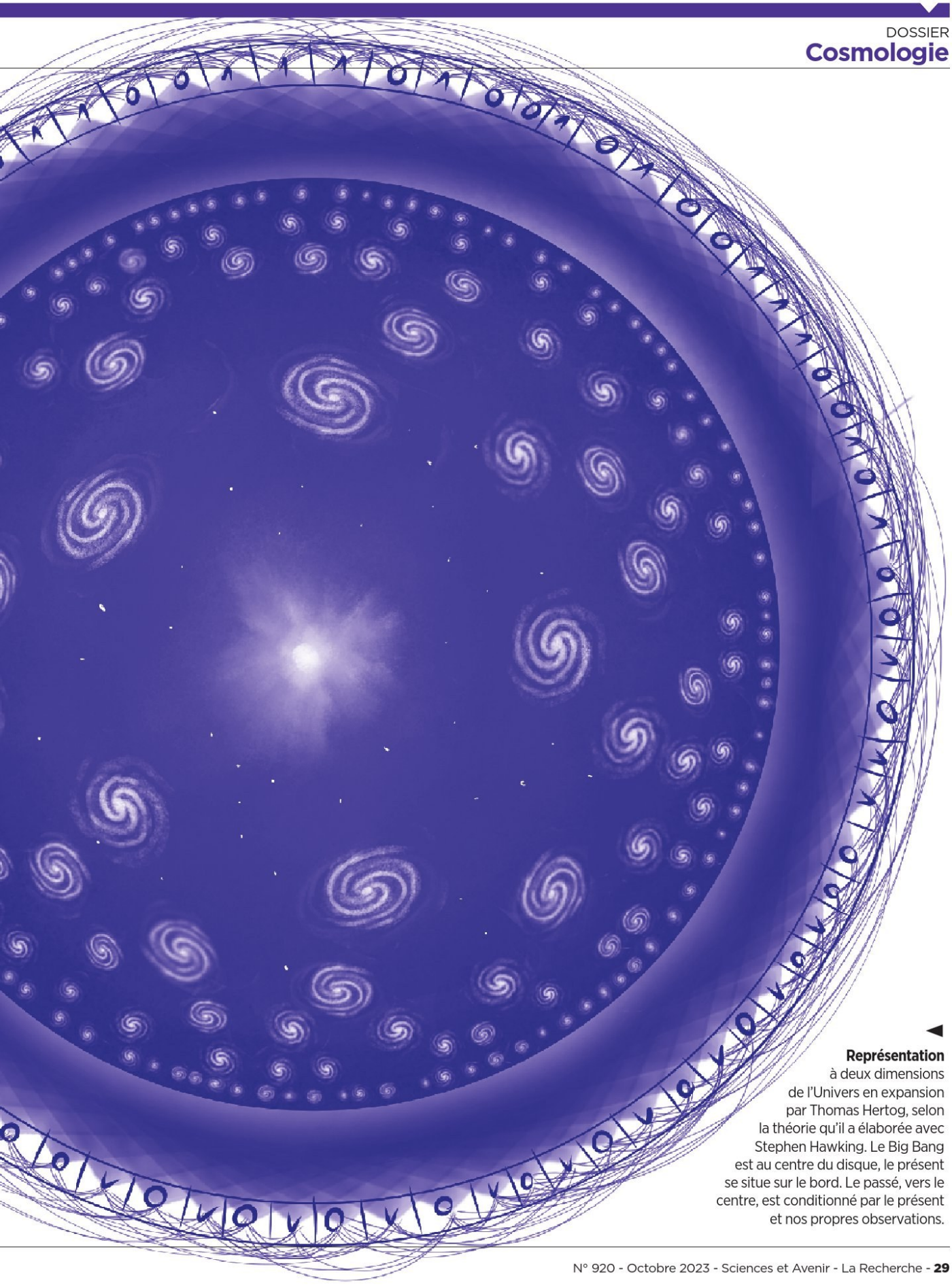
Le testament de Stephen Hawking

L'origine du temps

Jusqu'à son décès en 2018, le grand astrophysicien britannique Stephen Hawking travaillait à élaborer une nouvelle théorie expliquant les premiers instants de l'Univers. Son plus proche collaborateur, Thomas Hertog, nous entraîne dans les arcanes de cette « cosmologie descendante » mêlant habilement physique quantique, relativité générale et approche holographique.



Dossier réalisé par
Fabrice Nicot



Représentation à deux dimensions de l'Univers en expansion par Thomas Hertog, selon la théorie qu'il a élaborée avec Stephen Hawking. Le Big Bang est au centre du disque, le présent se situe sur le bord. Le passé, vers le centre, est conditionné par le présent et nos propres observations.

THOMAS HERTOG

La dernière théorie de Stephen Hawking

Le célèbre astrophysicien a travaillé à une nouvelle théorie décrivant l'émergence des lois physiques et du temps. Son collaborateur belge Thomas Hertog, coauteur de ces travaux, raconte cette aventure scientifique qu'il poursuit aujourd'hui. « Sciences et Avenir » lui a rendu visite à l'Université catholique de Louvain.

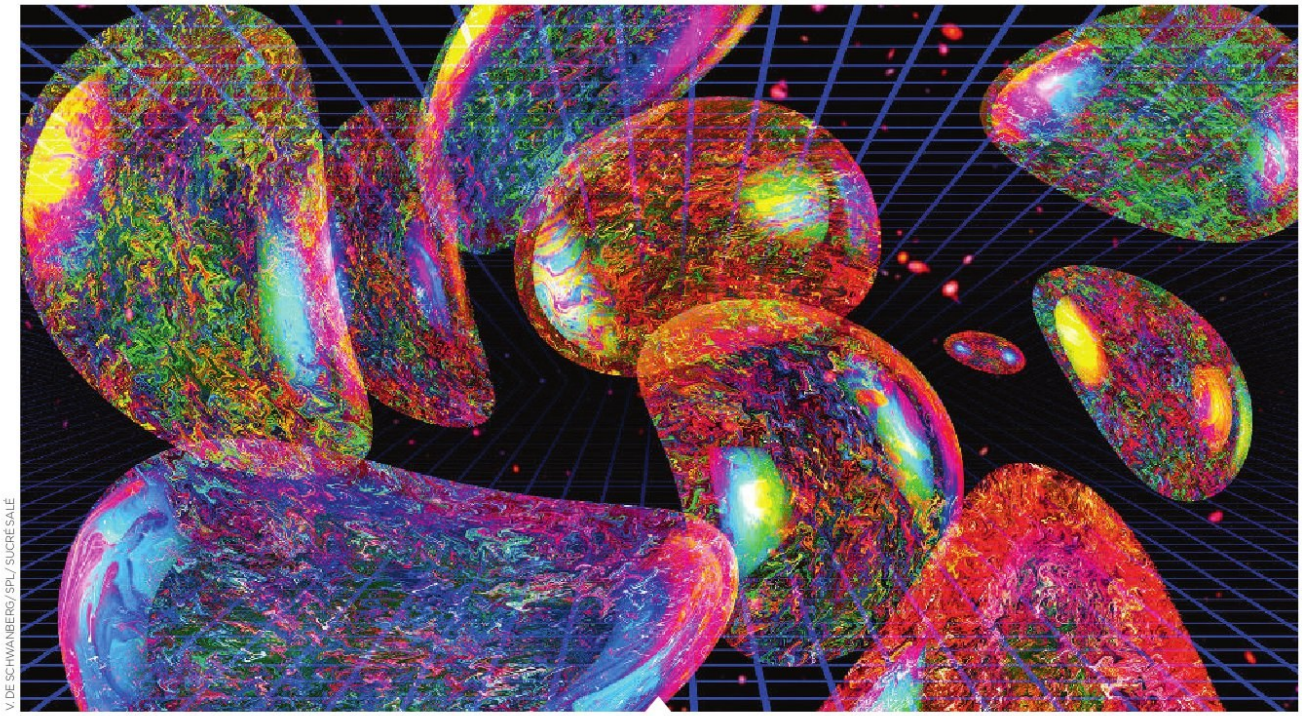
Pour Stephen Hawking, le temps s'est arrêté le 14 mars 2018 à Cambridge, après soixante-seize ans d'une existence largement consacrée à la physique. La maladie de Charcot, dont il souffrait depuis sa jeunesse, lui avait ôté peu à peu le contrôle de ses muscles, jusqu'à l'emporter. Cela ne l'a pas empêché de se hisser parmi les plus grands cosmologistes du XX^{e} siècle, grâce à ses découvertes majeures sur les trous noirs et le Big Bang *(lire p. 41)*. Dans les derniers mois de sa vie, c'est précisément la façon dont tout a commencé, l'origine du temps, qui occupe son esprit avec une acuité particulière. À mesure que la maladie l'enferme, les derniers développements de sa pensée sont saisis par celui qui est à la fois spectateur et coauteur des travaux de Hawking : son plus proche collaborateur, le cosmologiste Thomas Hertog. Leur complicité bâtie durant deux décennies leur permettra d'échanger jusqu'au bout, même lorsque Thomas Hertog ne pourra plus compter que sur une légère nuance dans le regard de Stephen Hawking comme signe d'approbation. Mêlant physique quantique et relativité générale, mais aussi des découvertes nouvelles comme l'holographie, et des emprunts aux concepts de la théorie de l'évolution de Charles Darwin, « H & H » élaborent une nouvelle vision de l'Univers. Elle prétend expliquer non seulement l'émergence du temps, mais aussi la nôtre grâce à une sélection « darwinienne » opérée au sein des lois de la physique, débouchant sur un univers créateur d'atomes, d'étoiles, de galaxies, et finalement de vie. *« Il est temps d'écrire un nouveau livre »* fut le dernier message de Stephen Hawking pour Thomas Hertog, qui le rédigera seul après la mort de son mentor, et dans la solitude forcée du confinement. *L'Origine du temps*, la dernière théorie de Stephen Hawking, est paru en avril aux éditions Odile Jacob. Nous allons tenter ici d'en extraire l'essentiel, avec l'aide de Thomas Hertog que nous avons longuement rencontré à l'Université de catholique de Louvain, en Belgique, où il poursuit ses recherches *(lire aussi p. 38)*.

La physique semble favorable à l'émergence de la vie

La question que se pose Stephen Hawking au moment de sa rencontre avec Thomas Hertog, en juin 1998, n'est pas l'origine du temps. C'est la nôtre : pourquoi les lois de la physique ont-elles permis l'apparition de la vie ? Toute la physique semble déterminée pour que la vie puisse éclore. Prenons l'expansion de l'Univers, qui s'accélère depuis environ 5 milliards d'années, sans que l'on sache pourquoi. Si cette accélération avait débuté plus tôt, et avec plus d'énergie, la matière n'aurait pas pu s'agréger pour former étoiles et planètes. Autre exemple : l'interaction gravitationnelle. Elle est bien plus faible que les trois autres forces fondamentales (interaction forte, faible et électromagnétique). *« Or avec une gravitation plus forte, les étoiles brûleraient*

ANNA N.ZYTKOW / THOMAS HERTOG COURTESY

Thomas Hertog a collaboré durant vingt ans avec Stephen Hawking. Ensemble, ils ont élaboré une nouvelle vision du cosmos (ici à Cambridge, au Royaume-Uni, dans le bureau du célèbre physicien mort en 2018).



V. DE SCHWANBERG/SPL/SUCRE SALÉ

Selon la théorie du multivers élaborée dans les années 1980, il existerait une infinité d'univers aux lois physiques différentes des nôtres. Stephen Hawking n'aura de cesse de trouver une alternative à ce multivers, ce qui va l'amener à son ultime théorie. (Vue d'artiste.)

plus rapidement et mourraient plus tôt, sans laisser à la vie le temps de se développer sur d'éventuelles planètes », note Thomas Hertog. Même au cœur de la matière, la physique semble s'être montrée bienveillante à notre égard. Ainsi, les neutrons sont très légèrement plus massifs que les protons, de 0,14 % seulement. « *Si cela avait été l'inverse, tous les protons de l'Univers se seraient rapidement désintégrés en neutrons après le Big Bang. Et sans les protons, il n'y aurait pas eu de noyaux atomiques, donc pas d'atome, pas de chimie.* » Ces lois et leurs constantes (vitesse de la lumière, charge de l'électron, etc.) auraient-elles pu être différentes ? Sommes-nous comme les heureux vainqueurs d'un incroyable loto cosmique, un alignement parfait des constantes ? Cela paraît statistiquement bien plus improbable que de gagner au loto classique, à moins d'imaginer une infinité de tirages…

C'est la théorie du multivers, conçue par le cosmologiste russo-américain Andrei Linde au début des années 1980. Au lieu d'un univers unique jailli du Big Bang il y a 13,7 milliards d'années, il faut imaginer le cosmos comme un ballon en expansion, d'où surgissent en permanence de nouvelles bulles issues de nouveaux Big Bang, comme des excroissances. Mais lors de chacun de ces débuts, les lois de la physique varieraient et déboucheraient sur des univers différents.

Selon Hawking, le multivers n'explique rien

Comment ces lois pourraient-elles ainsi fluctuer ? Imaginons un stylo maintenu perpendiculaire au plan d'une feuille par un doigt. S'il est lâché, il tombe et pointe dans une direction bien précise. Mais tant qu'il est retenu, toutes les directions sont possibles. De la même façon, dans les premiers instants de l'Univers, différentes configurations pour les lois physiques sont possibles, et différentes valeurs pour les constantes. Puis, à mesure que l'Univers refroidit, les lois physiques cristallisent, avec leurs constantes, comme le stylo qui tombe. Dans notre coin d'Univers, les constantes de la physique sont compatibles avec la vie, et logiquement nous sommes là pour le constater. Mais on peut penser que la plupart des autres univers sont vides, tant les conditions pour l'apparition de la matière sont nombreuses à réunir.

Hawking et Hertog contestent la vision classique de la cosmologie, selon laquelle les lois sont immuables et indépendantes de l'observateur

Cette idée du multivers, en vogue à la fin des années 1990, déplaît à Stephen Hawking. *« D'emblée, il n'a pas aimé le multivers,* confirme Thomas Hertog. *Ses réticences se sont confirmées au début des années 2000, lorsqu'il est devenu évident que le multivers n'expliquait en fait rien. Car il postule l'existence de "méta-lois" qui régissent tous les univers* [pour reprendre l'exemple du stylo, une méta-loi serait le stylo dans sa position initiale et toutes les possibilités qu'il a de tomber]. *Mais la théorie du multivers ne dit rien des règles reliant ces méta-lois aux lois locales de notre univers* [comment tombe le stylo]. *Il manque une passerelle. Il est ainsi impossible de faire des prédictions vérifiables à partir de ces méta-lois. Autrement dit, le multivers, c'est comme un placard Ikea sans notice de montage : inutile. »*

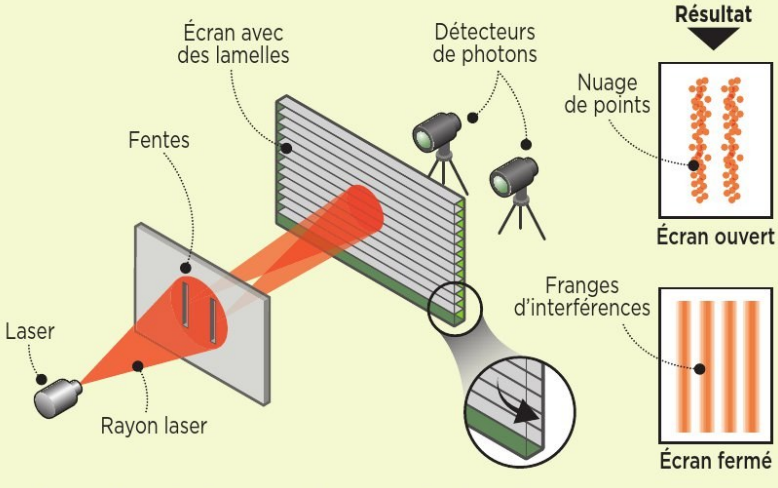
« Nous créons l'Univers autant qu'il nous crée »

Pour sortir de l'impasse, Stephen Hawking propose alors de renverser la table, comme souvent chez lui. *« Il a commencé à expliquer que nous n'étions pas "des anges observant l'Univers de l'extérieur". Nous habitons l'Univers, et le fait que nous l'observions tout en en faisant partie doit modifier en profondeur notre vision de la cosmologie. »* Qu'est-ce que l'astrophysicien britannique entend par là ? Revenons à la vision classique de la physique comme un ensemble de lois permettant de décrire l'évolution d'un système à partir de ses conditions initiales. Par exemple, grâce aux lois de Newton, il est possible de prévoir le comportement d'une balle lâchée d'un premier étage : combien de rebonds, à quelle hauteur, etc. Élargissons le système à l'Univers tout entier. À partir des conditions initiales du Big Bang, les lois de la physique devraient permettre de décrire l'évolution de l'Univers jusqu'à son état actuel : courbure, densité de matière, quantité de matière noire, d'énergie noire, etc. Trouver l'en-

EXPÉRIENCE DES CHOIX RETARDÉS

Quand on essaie de piéger un photon… sans y parvenir

Dans l'expérience des fentes de Young, un laser envoie des photons un à un vers deux fentes. Sur l'écran placé derrière, une figure d'interférences apparaît photon par photon, avec une alternance de bandes lumineuses (où ils se concentrent) et sombres, qu'ils délaissent. Cela traduit le caractère ondulatoire des photons, qui passent par les deux fentes à la fois, comme le ferait une onde. Si, maintenant, un détecteur est placé au niveau de chaque fente afin de savoir par laquelle le photon passe, alors la figure d'interférence disparaît. Les photons se comportent comme des particules et passent par l'une ou l'autre des fentes, et non par les deux à la fois.
Dans la variante de Wheeler, les détecteurs de photons sont placés derrière l'écran remplacé par une sorte de store à lamelles. Chacun est dans l'alignement d'une des deux fentes. Si le store est fermé, une figure d'interférence apparaît car aucun détecteur n'observe la trajectoire des photons. S'il est ouvert, l'expérimentateur voit par où passe le photon et la figure d'interférence disparaît. Mais que se passe-t-il si l'on prend la décision d'ouvrir le store juste après que le photon a franchi les fentes ? Aucune figure d'interférence n'apparaît ! Le photon se comporte comme si sa trajectoire avait été observée alors qu'au moment précis où il est passé par l'une des fentes, elle ne l'est pas encore. Le choix d'observer le comportement du photon sélectionne alors un passé cohérent avec les règles de la physique quantique.



Dans cette variante de l'expérience des fentes de Young, le choix d'observer ou non le trajet du photon est fait après qu'il a franchi les fentes. Un store à lamelles permet de faire ce choix au dernier moment.

BRUNO BOURGEOIS

semble de ces lois, ainsi que les conditions initiales, est précisément ce que cherchent à faire les astrophysiciens.
Mais il est sous-entendu dans cette vision classique que les lois existent en dehors de nous. Elles sont immuables et indépendantes de l'observateur. Or, on sait que c'est faux au moins pour la physique quantique, qui régit le monde de l'infiniment petit. Ainsi, les équations de la mécanique quantique ne décrivent pas la trajectoire d'une particule élémentaire, comme un électron, mais l'ensemble des trajectoires possibles. La particule n'est définie en un lieu que par une « probabilité de présence ». Pour connaître précisément sa position, il faut faire une mesure. Et c'est bien la mesure qui fixe la particule en un endroit précis et influe sur son destin, en quelque sorte.

V. VENNIN

« Selon Hawking et Hertog, en pratiquant une observation, on sélectionne une histoire cohérente avec cet acte d'observation »

Vincent Vennin, chercheur au laboratoire de physique de l'École normale supérieure, à Paris

Traditionnellement, la cosmologie ne se préoccupe guère de physique quantique car, à l'échelle gigantesque des étoiles et des galaxies, seule la relativité générale d'Einstein — qui décrit l'attraction gravitationnelle comme une déformation de l'espace-temps — est à la manœuvre pour expliquer leur dynamique. Sauf dans les premiers instants de l'Univers, où celui-ci est si petit et si dense que les effets quantiques ne peuvent être négligés. Ils deviennent même prépondérants. L'étude du Big Bang, autrement dit la naissance de l'espace, du temps, et de nos lois physiques, nécessite de trouver une théorie quantique de la gravitation, activement recherchée. Mais H & H estiment que cette théorie ne doit pas être pensée comme quelque chose d'extérieur à l'Univers, comme une loi immuable et transcendante qui en quelque sorte dépasse l'Univers. Il faut prendre en compte le fait que nous-mêmes cherchons à observer ce commencement. Un bouleversement conceptuel que décrypte Vincent Vennin, chercheur au laboratoire de physique de l'École normale supérieure, à Paris : *« Dans la vision de Hawking et de Hertog, il ne sert à rien de se demander quel est l'état initial de l'Univers ayant conduit progressivement à l'apparition des galaxies, des planètes et de l'humanité qui pose la question aujourd'hui. Selon eux, en pratiquant une observation, on sélectionne une histoire cohérente avec cet acte d'observation. Donc une histoire où la vie apparaît forcément. Et cela même si elle semble très improbable et qu'elle sous-tend une série de constantes de la physique compatibles avec la vie. »* Ainsi, notre passé dépend de nos observations. Ce que Stephen Hawking résume par *« Nous créons l'Univers autant qu'il nous crée »*.
Pour comprendre ce concept déroutant, il faut d'abord rappeler que la physique quantique a l'habitude de bousculer notre sens commun. Ainsi, il existe une expérience dite des choix retardés, imaginée par le physicien John Wheeler en 1978, où le passé d'une particule dépend du fait que l'on cherche à déterminer sa trajectoire ou non *(lire l'encadré p. 33)*. *« Elle montre que le passé quantique n'est pas 100 % déterminé, il faut tenir compte des observations que l'on fait aujourd'hui. Autrement dit, les questions que l'on pose à la nature influent sur ce qu'on peut dire du passé »*, insiste Thomas Hertog. H & H ont étudié les conséquences de ce phénomène des choix retardés sur la naissance de l'Univers, et notamment l'émergence des propriétés favorables à la vie de la physique. Des modifications des lois physiques se produiraient au tout début du Big Bang, selon un procédé rappelant la théorie de l'évolution de Charles Darwin, dont il est souvent fait mention dans l'ouvrage de Thomas Hertog. *« La théorie de Darwin ne détaille pas le chemin suivi par l'évolution depuis les débuts de la vie jusqu'à la biosphère diverse et complexe d'aujourd'hui. […] Elle admet que la vie telle que nous la connaissons est le produit de […] loi[s] et d'une histoire particulière »* (*L'Origine du temps*, p. 49). Adapté à la physique, cela signifie que l'univers primitif a connu un processus semblable à la sélection naturelle, les lois fondamentales ayant évolué au gré de l'histoire primordiale de l'Univers. *« Dans les premiers instants du Big Bang, alors que la physique quantique prédomine, des variations ont pu avoir lieu du fait même du caractère aléatoire de la physique quantique, où tout est probabilité »*, explique Thomas Hertog. Ainsi, une loi évolue car ses caractéristiques peuvent connaître des petits écarts par rapport à sa configuration initiale. *« La sélection entre alors en jeu, car certains de ces écarts peuvent être amplifiés et figés par l'observation. Cela débouche sur de nouvelles règles qui contribuent à façonner l'évolution ultérieure. »*

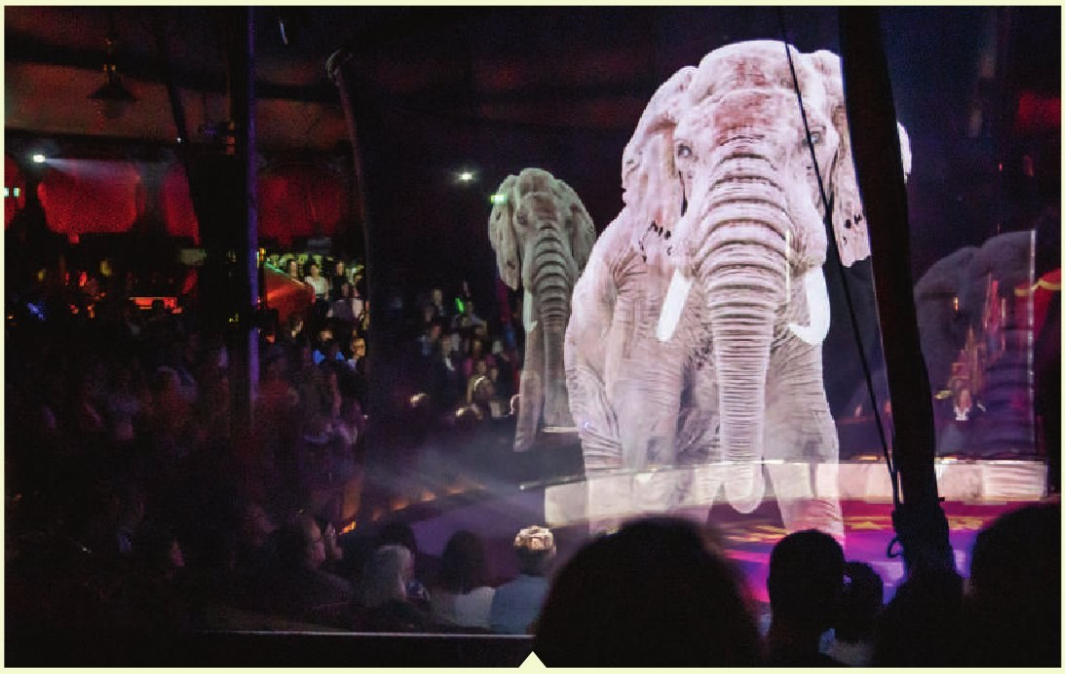
L'étrange concept de cosmologie descendante

H & H ont baptisé leur théorie « cosmologie descendante » car, nous l'avons vu, elle introduit un élément rétroactif dans la cosmologie : le passé est conditionné par le présent, par les observations que l'on pratique. Mais attention, il n'est pas modifié par le présent : aucune information ne remonte le temps. Pour saisir ce concept étrange, Thomas Hertog mentionne une variante du jeu des 20 questions inventé par John Wheeler

THÉORIE HOLOGRAPHIQUE

Étudier deux représentations différentes d'une même réalité physique

La théorie holographique est *« dans mon domaine le changement de paradigme le plus significatif de ces dernières années »*, avance Francesco Nitti, physicien théoricien au Laboratoire astroparticule et cosmologie (université de Paris). Elle se résume à étudier deux représentations différentes d'une même réalité physique, un peu comme un photon est à la fois une onde et un corpuscule. Ainsi, les chercheurs travaillent notamment à établir une équivalence *« entre, d'un côté, des particules décrites comme des vaguelettes se propageant sur l'océan dans un espace plat où la gravitation n'intervient pas* [théorie quantique des champs]. *Et, de l'autre côté, des particules décrites comme des cordelettes vibrantes* [théorie des cordes] *où la gravitation se manifeste avec une déformation de l'espace-temps. Autrement dit, la gravitation peut être vue comme une façon différente mais équivalente de décrire la physique quantique des particules. Le fait que la description gravitationnelle implique des dimensions d'espace supplémentaires explique l'analogie avec un hologramme. Cette dualité permet de parvenir à une théorie quantique de la gravitation tant recherchée. »* Seulement, cette correspondance a été établie de façon précise lorsque le côté gravitationnel — ou de la théorie des cordes — est un espace statique, et non un espace-temps en expansion comme notre univers. Revenir à une géométrie proche de notre univers est l'objectif des travaux de Stephen Hawking et Thomas Hertog. À ce propos, Francesco Nitti estime que *« cette approche est très intéressante. Ils poussent le concept d'holographie à la limite. C'est ambitieux, mais c'est une direction à creuser. »*



CHRISTIAN CHARISIUS / DPA / AFP

Un hologramme crée l'illusion d'une troisième dimension à partir d'informations codées dans une image 2D (ici à Hambourg, en Allemagne, en 2019). En physique, la théorie holographique envisage en quelque sorte certaines dimensions comme fictives.

en personne. Dans ce jeu bien connu, il s'agit de faire deviner à l'un des joueurs un mot ou une personne en répondant à ses questions. La variante introduite par John Wheeler consiste en ce que les protagonistes décident de ne pas choisir un mot, mais qu'ils se comportent comme s'ils l'avaient fait. Ils doivent donc répondre de manière cohérente aux questions du joueur qui ignore ce fait. L'enchaînement des questions restreint au fil du temps les possibilités, et le questionneur et les interrogés convergent vers un mot bien précis. Mais ce mot, que tout le monde ignore au départ puisqu'aucun n'a été choisi, dépend bien uniquement des questions posées. *« De la même manière, un univers quantique s'assemble lui-même en permanence […] à travers un dédale de possibilités. […] Son histoire n'est pas une seule histoire se révélant de manière déterministe, une chose arrivant après l'autre, mais une énorme synthèse qui nous inclut et dans laquelle ce qui se passe aujourd'hui forge de manière rétroactive ce qui s'est produit auparavant »*, conclut Thomas Hertog dans son ouvrage (p. 295).

Le temps vu comme une dimension émergente

Les idées clés de la cosmologie descendante ont été publiées par Stephen Hawking et Thomas Hertog en 2006. Mais il leur manquait un élément fondamental : une base mathématique. Elle va venir d'une petite révolution en cours à l'époque : l'holographie *(lire p. 35)*. Pour la résumer très succinctement, la théorie holographique est ainsi nommée par analogie avec les hologrammes qui sont des images à deux dimensions donnant l'illusion d'une troisième. Ses racines plongent dans une découverte réalisée en 1973 par le physicien israélo-mexicain Jacob Bekenstein (1947-2015). Il démontre — et Stephen Hawking le fera d'une autre manière par la suite — que toute l'information enregistrée par un trou noir, son histoire, est proportionnelle à son aire, une surface à deux dimensions. Et non à son volume comme on pouvait s'y attendre. C'est comme si l'on stockait davantage d'informations à la surface d'une boîte qu'à l'intérieur ! La troisième dimension, l'intérieur du trou noir, apparaît comme la dimension émergente, non nécessaire à la description du trou noir. Tout comme une image holographique donne l'illusion d'une troisième dimension, alors que toutes les données de l'image sont codées sur une surface, la troisième dimension étant révélée par un éclairage laser.

En 1997, le physicien argentin Juan Maldacena, âgé de seulement 29 ans, transpose cette idée à la théorie des cordes (les particules n'y sont pas considérées comme des points, mais comme des cordelettes vibrantes), qui tente de réconcilier physique quantique et relativité générale. Seulement, pour simplifier les calculs et les rendre possibles, il travaille dans un espace en contraction éloigné du nôtre. Logiquement, H & H cherchent à appliquer les travaux de Maldacena dans l'Univers en expansion, conforme au nôtre. Ils remarquent alors que les deux sont plus étroitement liés qu'on ne l'imagine. Expansion ou

LES PREUVES EXPÉRIMENTALES

Quelques pistes pour tester la théorie de la cosmologie descendante

Les ondes gravitationnelles primordiales

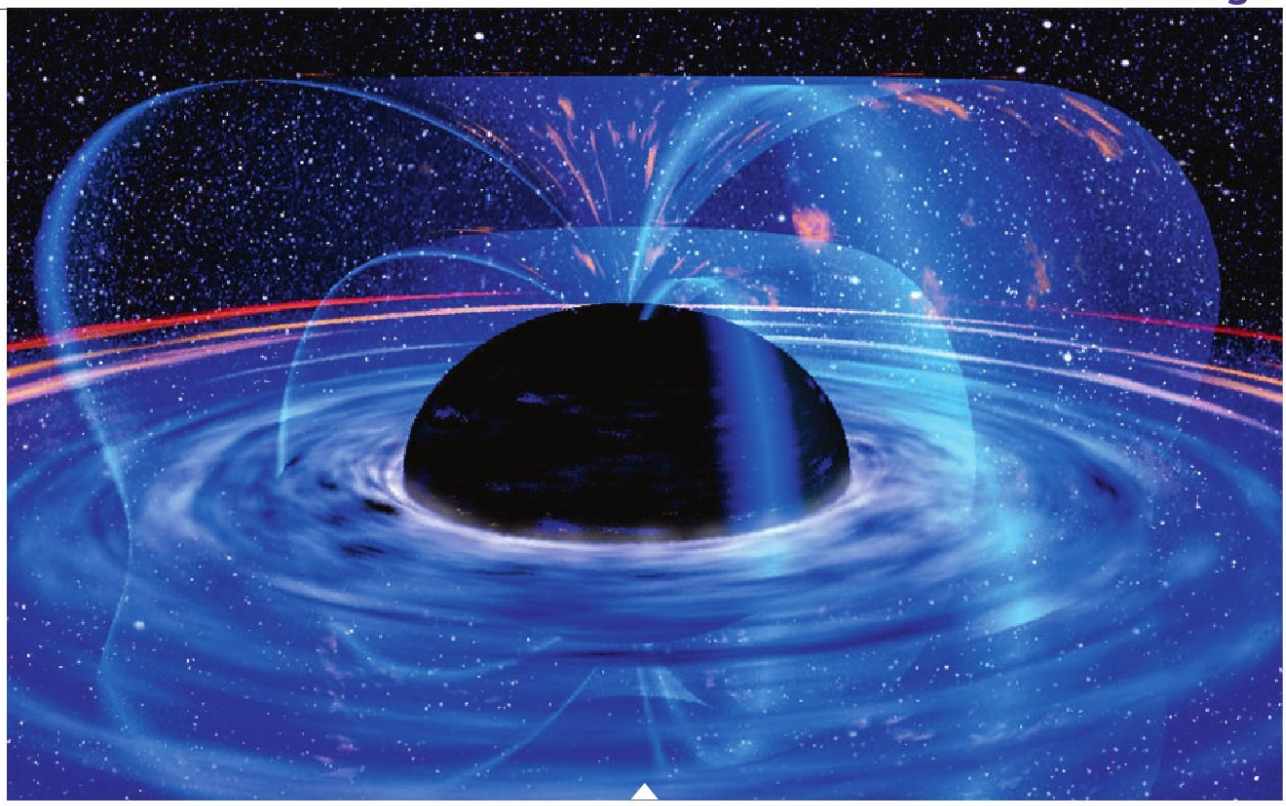
Ces vibrations de l'espace-temps ont été émises juste après le Big Bang, durant la phase d'inflation qui a suivi. La théorie de Hertog fait des prédictions sur la nature et les caractéristiques de cette période, qui devraient influencer la forme des ondes gravitationnelles primordiales. Avec l'interféromètre Lisa, ainsi que les observations futures du fond diffus cosmique, les cosmologistes espèrent les mesurer. La mise en orbite de Lisa est prévue pour 2034.

La constante de Hubble (Ho)

Il s'agit du coefficient de proportionnalité entre la distance séparant deux galaxies et la vitesse à laquelle elles s'éloignent l'une de l'autre. Pour la mesurer, les cosmologistes utilisent plusieurs méthodes qui ne donnent pas la même valeur. Mais certaines calculent Ho au tout début de l'Univers, d'autres bien plus près de nous. Soit l'une de ces méthodes est fausse, soit la valeur de Ho aurait varié au fil du temps, confortant l'approche de Hertog de lois de la physique non figées.

La théorie holographique

La recherche est intense autour de l'étude des trous noirs en laboratoire, notamment par la voie holographique. D'ores et déjà, des expérimentateurs mettent au point des systèmes quantiques intriqués, constitués d'atomes ou d'ions piégés, qui traduisent de manière holographique certaines propriétés des trous noirs. Un trou noir étant en quelque sorte un Big Bang à l'envers, l'étude de ces systèmes pourrait renseigner sur l'émergence du temps tel que Hawking et Hertog la conçoivent.



NASA

Dans un trou noir, toutes les informations qu'il contient sont « stockées » à sa surface, et non à l'intérieur, comme si la troisième dimension n'existait pas.

contraction, ce n'est finalement qu'un changement de signe de la constante cosmologique qui traduit la dynamique de l'espace-temps. Mais fondamentalement, le phénomène reste le même, à une différence notable près… *« Dans un espace en contraction du type Maldacena, la dimension envisagée comme une projection holographique est la dimension spatiale,* explique Thomas Hertog. *Dans un espace en expansion, la dimension qui émerge… c'est le temps ! Avec cette conséquence fondamentale : c'est l'histoire elle-même qui est "encodée" de manière holographique. Remonter ce "temps holographique" revient à perdre de plus en plus de ces données codées holographiquement : l'hologramme devient de plus en plus flou, comme une image qui pixélise.* » Dans cette cosmologie descendante holographique, le Big Bang devient le moment où l'information inscrite dans l'hologramme disparaît totalement. Alors il n'y a plus de temps, ni de lois physiques. La physique elle-même devient à naître.

Ne pas prendre à la légère les intuitions de Hawking

Bien entendu, cela reste une théorie et bien des calculs seront nécessaires afin de la vérifier, comme le souligne Vincent Vennin : *« La démarche de Hawking et Hertog modifie notre façon de penser l'Univers, ce qui la rend très intéressante, à condition qu'elle soit capable de faire des prévisions que l'on pourra vérifier. Pour l'heure, cela ressemble davantage à une intuition. Mais les intuitions de Hawking ne sont pas à prendre à la légère. Il a plusieurs fois émis des hypothèses qui paraissaient presque farfelues, et dont on s'est rendu compte par la suite qu'elles recélaient des choses profondes… Par ailleurs, la mécanique quantique existe depuis presque un siècle et nous n'en avons pas tiré toutes les conséquences. Il manque une "quantification" de la gravité et tant que ce ne sera pas fait, des questions resteront ouvertes.* »

Débattre de la théorie ? Thomas Hertog n'attend que ça. Il propose déjà quelques pistes pour la tester *(lire l'encadré p. 36)*. Et à l'automne, un premier colloque lui permettra d'en discuter avec d'autres cosmologistes. Sans Stephen Hawking… Mais pour Thomas Hertog, le cosmologiste britannique était convaincu de la justesse de leur vue. *« Il était ravi d'être parvenu à cette vision originale qui remet l'observateur au centre de l'Univers et évite les paradoxes associés à l'idée du multivers. La dimension darwinienne lui plaisait également. À la toute fin de sa vie, c'était comme un accomplissement.* » ■

Le Big Bang est le moment où l'information inscrite dans l'hologramme disparaît. Alors il n'y a plus de temps, ni de lois physiques

THOMAS HERTOG
COSMOLOGISTE, PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN, EN BELGIQUE

Comment est née notre vision « darwinienne » du cosmos

Le cosmologiste Thomas Hertog évoque sa longue collaboration avec Stephen Hawking, et revient sur les grandes étapes de l'élaboration de leur théorie de la « cosmologie descendante ».

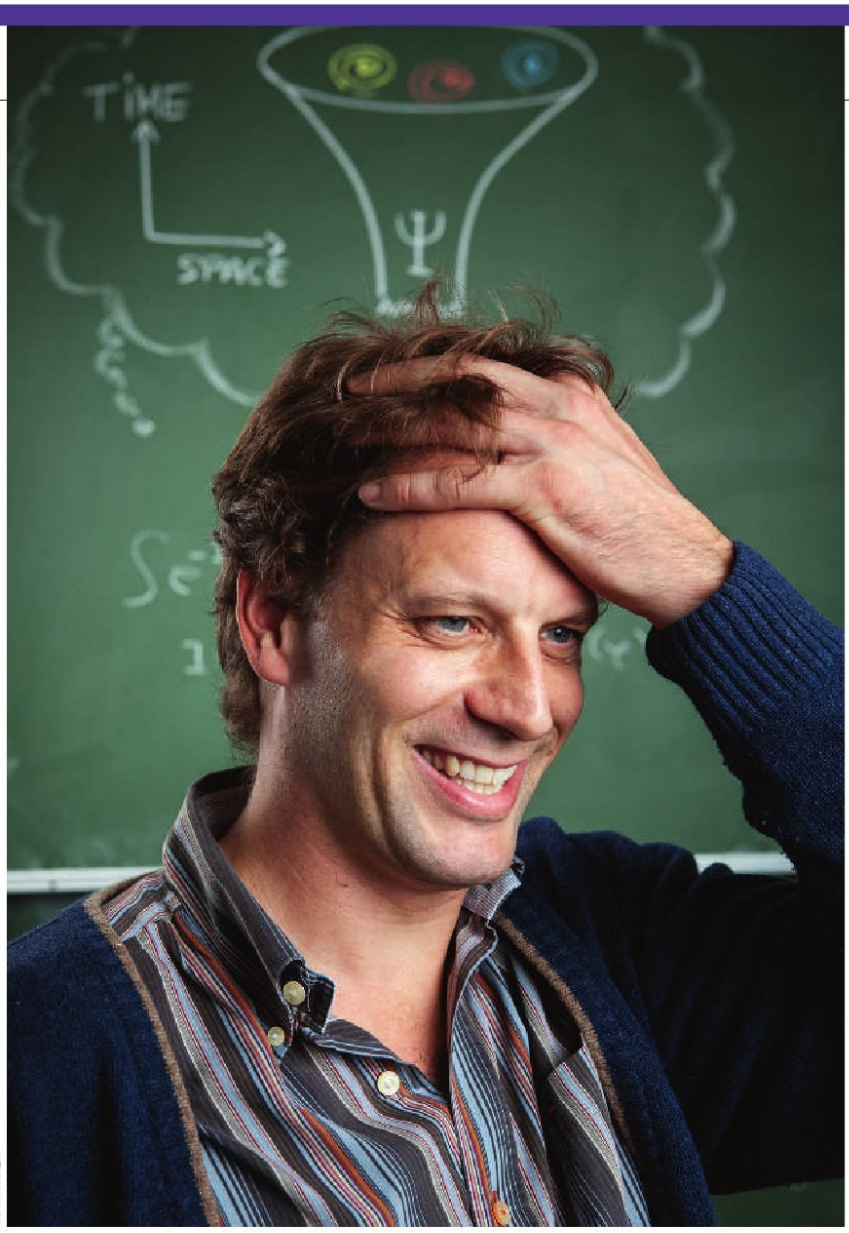
Quand s'est déroulée votre première rencontre avec Stephen Hawking ?
À la mi-juin 1998. J'étais alors étudiant à Cambridge (Royaume-Uni). J'avais notamment suivi le cours de Neil Turok, un collègue de Hawking, dans le cadre du diplôme de mathématiques avancées. À la fin de l'année universitaire, Neil m'a informé que Stephen souhaitait faire ma connaissance. Il avait eu vent de mes excellents résultats à l'examen et voulait savoir si je pouvais faire un bon doctorant sous sa direction. Alors je suis allé le voir dans son vieux bureau poussiéreux, perdu dans le labyrinthique département de mathématiques appliquées et de physique théorique de Cambridge. Notre première conversation a porté sur le multivers d'Andrei Linde *(lire p. 30)*. Il m'a fait part de ses doutes concernant l'existence d'univers multiples et m'a demandé mon avis. C'est ainsi que je suis devenu son étudiant…

Comment s'est organisée votre collaboration ?
En thèse, je le voyais presque tous les jours, et parfois même le soir. Stephen ne faisait pas vraiment de différence entre le travail et sa vie personnelle. Ses étudiants et collègues faisaient un peu partie de sa famille. Et il nous arrivait très souvent de discuter de cosmologie au pub ! Après mon doctorat, j'ai pris un peu de distance avec lui. Être l'étudiant de Stephen Hawking peut devenir écrasant. J'avais besoin d'exister comme scientifique par moi-même. Il m'encourageait dans ce sens d'ailleurs. Après quelques années, notre collaboration a repris. Je suis arrivé à l'Université catholique de Louvain. Nous avons pris l'habitude de nous voir tous les deux mois environ. Je venais à Cambridge ou il venait en Belgique pour une semaine. Nous libérions nos agendas et nous passions tout notre temps à discuter. C'était la manière de travailler préférée de Stephen. Il n'envoyait pas beaucoup de courriels…

De quelle manière sa maladie a-t-elle influencé son travail et votre collaboration ?
À partir du début des années 1980, Stephen a perdu la capacité d'écrire des équations et il a dû apprendre à faire de la physique autrement. Il s'est mis à l'envisager sous un aspect plus géométrique, plus visualisable et finalement plus intuitif. Il laissait les calculs à ses collaborateurs, et lui se concentrait sur le cadre conceptuel. Cette capacité à visualiser la physique est devenue un des moteurs de son inventivité, et cela de façon remarquable.
Sinon, au quotidien, échanger avec Hawking signifiait toujours un délai de réponse assez long de sa part. Il devait utiliser un logiciel pour former des

BIO EXPRESS

- **1975 :** Naissance à Louvain (Belgique).
- **1998 :** Rencontre avec Stephen Hawking.
- **2002 :** thèse de doctorat sur l'origine de l'inflation (université de Cambridge, Royaume-Uni).
- **2011 :** Professeur de physique théorique à l'Université catholique de Louvain (KU Leuven).
- **2013 :** Lancement du projet de recherche européen Holographic Quantum Cosmology.
- **2023 :** Parution de *L'Origine du temps : la dernière théorie de Stephen Hawking*, Odile Jacob.



GUY KOKKEN

phrases. Alors il fallait choisir avec soin les questions qu'on lui posait. D'autre part, son temps de réponse nous permettait de réfléchir. Cela donnait des entretiens très denses. Il y avait des moments très drôles aussi, quand il se trompait de mot dans le logiciel. Ou quand il faisait des blagues. Stephen adorait faire rire.

Comment s'est élaborée votre théorie de la « cosmologie descendante » ? Quels sont vos apports et ceux de Stephen Hawking ?

Elle s'est développée en trois phases. L'intuition initiale qu'il fallait prendre un point de vue « descendant » [où le présent conditionne le passé et non l'inverse, *lire p. 30*] sur l'Univers et son histoire primordiale vient de Hawking en 2002. Puis nous avons réalisé que la théorie quantique nous permettait de développer ce point de vue « descendant », car elle l'utilise déjà d'une certaine façon *(lire l'encadré p. 33)*, et nous avons commencé à repenser toute la cosmologie à travers ce prisme.

Dans un premier temps, la nouvelle cosmologie descendante restait controversée… Certains collègues argumentaient qu'un point de vue descendant n'était qu'un choix, pas une théorie. D'autres, comme David Gross [physicien américain spécialiste de la théorie des cordes], regrettaient que l'on abandonne l'objectif de trouver une explication de l'Univers selon l'approche classique, où l'on cherche à le décrire tel qu'il est aujourd'hui à partir de lois fondamentales préexistantes. Enfin, en 2012, j'ai réalisé que la théorie holographique, alors en plein développement *(lire l'encadré p. 35)*, implique une cosmologie descendante. Cette découverte a donné une assise bien plus solide à notre hypothèse.

Quelles sont les réactions au sein de la communauté des cosmologistes ?

L'origine de cette réflexion se situe dans les années 1990 avec les débats autour de la grande question : d'où venons-nous ? Qu'est-ce qui est à l'origine de la « biophilie » mystérieuse de l'Univers ? Or je constate que les explications scientifiques en vogue à cette époque, comme l'idée du multivers ou d'une « théorie du tout » sont bien mortes. Mais ces questions se posent toujours. Nous offrons donc une toute nouvelle hypothèse « darwinienne », fondée sur une évolution au sein de la physique. La communauté scientifique fait preuve d'intérêt tout en restant critique, à juste titre. Les grandes conséquences de notre hypothèse doivent maintenant être étudiées et testées. Dans notre théorie « darwinienne » du cosmos, nous manquons cruellement de fossiles témoignant de cette évolution primordiale !

Dans votre ouvrage, vous semblez considérer comme acquise la théorie des cordes, qui va de pair avec la théorie holographique. Mais ce n'est encore qu'une hypothèse…

La cosmogénèse que nous proposons est en rapport avec la théorie des cordes, mais elle va bien plus loin. La découverte que des trous noirs, et finalement tout l'Univers, possèdent des propriétés holographiques et que les lois de la physique auraient pu être différentes, devance et dépasse la théorie des cordes. Et quoi qu'il en soit, celle-ci a permis aux physiciens de mieux comprendre comment la gravitation et la dimension du temps peuvent émerger d'un holo-

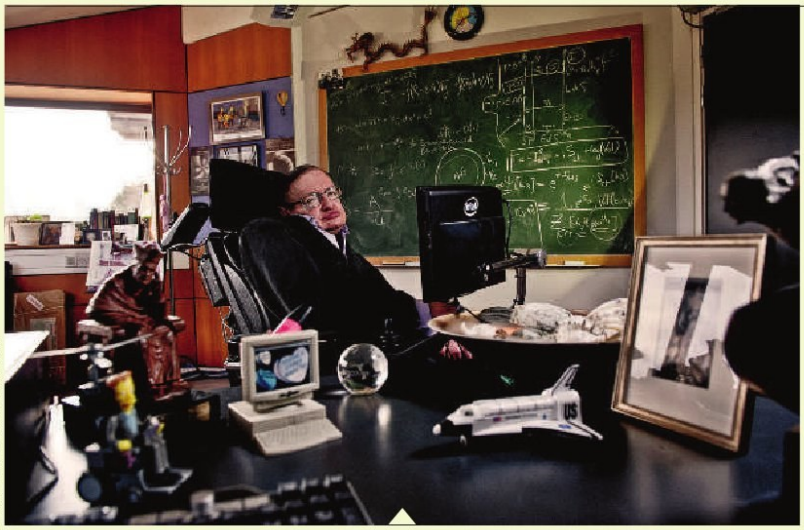
29 SCIENTIFIQUES
PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel



SARAH LEE/EYEVINE/BUREAU 233

Le physicien britannique (ici dans son bureau de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, en 2011) a principalement travaillé sur les trous noirs.

PARCOURS

Les principaux travaux de Stephen Hawking

Le physicien théoricien, titulaire de la chaire de mathématiques de Cambridge (Royaume-Uni) — et donc lointain successeur d'Isaac Newton (1642-1727) —, s'est intéressé à de nombreux aspects de la cosmologie. Néanmoins, l'essentiel des travaux pour lequel il est unanimement reconnu aujourd'hui concerne les trous noirs. À la fin des années 1960, avec son collègue Roger Penrose (prix Nobel 2020), il démontre que les singularités — des points où la densité et la courbure de l'espace-temps deviennent infinies — sont inévitables à l'intérieur des trous noirs et au début de l'Univers (Big Bang).

La plus grande contribution de Stephen Hawking aux trous noirs vient quelques années plus tard, en 1974. Le chercheur démontre que ces astres rayonnent. Ils ne seraient donc pas tout à fait noirs ! Ce « rayonnement de Hawking » s'expliquerait par un phénomène quantique. Le vide, du point de vue de la physique, ne l'est qu'en apparence. En réalité, il est rempli de particules et d'antiparticules, qui vont par paires, s'annihilent, puis se reconstituent sans cesse. À proximité des trous noirs, les paires sont dissociées : l'une tombe dans le trou noir, l'autre s'en échappe, ce qui donne à l'observateur l'impression que le trou noir rayonne. *In fine*, le trou noir s'évapore, d'autant plus vite qu'il est de faible masse. Si cette hypothèse est assez couramment admise, ce rayonnement n'a toutefois pas encore été observé.

En cosmologie, on doit aussi à Stephen Hawking le modèle d'« Univers sans bord », publié en 1983 en collaboration avec le physicien américain James Hartle (1939-2023). Selon ce modèle, lorsque l'on remonte au plus près du Big Bang, la dimension du temps ne se différencie plus d'une dimension d'espace. Le temps disparaît et l'Univers n'a ainsi pas de commencement, comme nous l'entendons habituellement.

La dernière théorie de Stephen Hawking, la cosmologie descendante, reprend des éléments de l'Univers sans bord.

gramme. On peut même dire qu'elle nous a appris comment lire ces hologrammes. Néanmoins, je ne peux toujours pas vous dire si notre hypothèse sur le Big Bang sera totalement intégrée dans la théorie des cordes, ou si elle bouleversera notre conception de cette dernière, en tous les cas quand on l'applique sur l'Univers dans sa totalité.

Le philosophe Francis Wolff (lire p. 42) salue votre « inventivité conceptuelle », mais il constate qu'il ne sait toujours pas ce qu'est le temps car vous « refusez de le définir comme concept à la manière des philosophes ». Vous écrivez que Stephen Hawking vous avait dit : « La philosophie est morte. » Quel était son rapport avec elle, et quel est le vôtre ?

Je me refuse à définir le temps comme un concept *a priori*. C'est la beauté de la science. Il me semble que nos travaux évoquent un concept de temps qui n'est ni celui de la physique du XXe siècle, ni le temps ultime de la conscience humaine, celui de Proust ou de Joyce. Dans notre cosmologie, l'origine du temps apparaît comme un phénomène émergent, qui dépend du contexte et des questions que l'on pose à la nature, mais qui est néanmoins accessible à l'analyse scientifique.

Hawking était réticent à la philosophie. Néanmoins, j'estime que l'ensemble de ses travaux ont été créatifs d'un point de vue philosophique, la cosmologie descendante avec sa « révolution darwinienne » en est un exemple. Lorsqu'il a prétendu que *« la philosophie est morte »*, il ne faisait que référence, à mon avis, à une philosophie découplée des aspects scientifiques.

Quant à moi, j'estime qu'un dialogue transdisciplinaire est essentiel. Non seulement il clarifie le sens, la signification des découvertes scientifiques, mais il nourrit surtout la culture scientifique. Ainsi, cela permet d'éviter que la science, et surtout la technologie à laquelle elle mène, échappent à notre contrôle. ■

Propos recueillis par F. N.

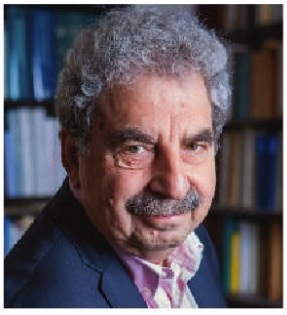
FRANCIS WOLFF
PROFESSEUR ÉMÉRITE À L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE À PARIS

« L'intarissable inventivité conceptuelle de Hawking »

Francis Wolff, qui vient de publier un ouvrage sur le temps, réagit au livre de Thomas Hertog, issu de sa collaboration avec Stephen Hawking. Le philosophe regrette que ce « traité de cosmologie générale » ne définisse pas plus clairement le « temps ».

« Thomas Hertog a intitulé son ouvrage *L'Origine du temps*, en référence à *L'Origine des espèces* de Charles Darwin, mais du « temps » proprement dit, il est finalement peu question. L'ouvrage s'apparente à un traité de cosmologie générale expliquant les ajustements fins *(fine-tuning)* des différents paramètres de notre univers qui ont permis l'existence des galaxies et finalement de la vie. Le temps émerge comme une conséquence de la théorie de la « cosmologie descendante » élaborée par Stephen Hawking et l'auteur. On suit avec plaisir le cheminement intellectuel de Hawking, qui renonce successivement à la recherche d'une théorie du Tout, au principe « anthropique » [selon lequel l'Univers a été paramétré pour nous] et enfin aux multivers, pour élaborer cette nouvelle vision du cosmos qui témoigne de son intarissable inventivité conceptuelle.

Mais je constate une fois le livre refermé qu'on ne sait pas ce qu'est le temps. Et encore moins son « origine », puisque l'idée d'origine suppose celle de temps!

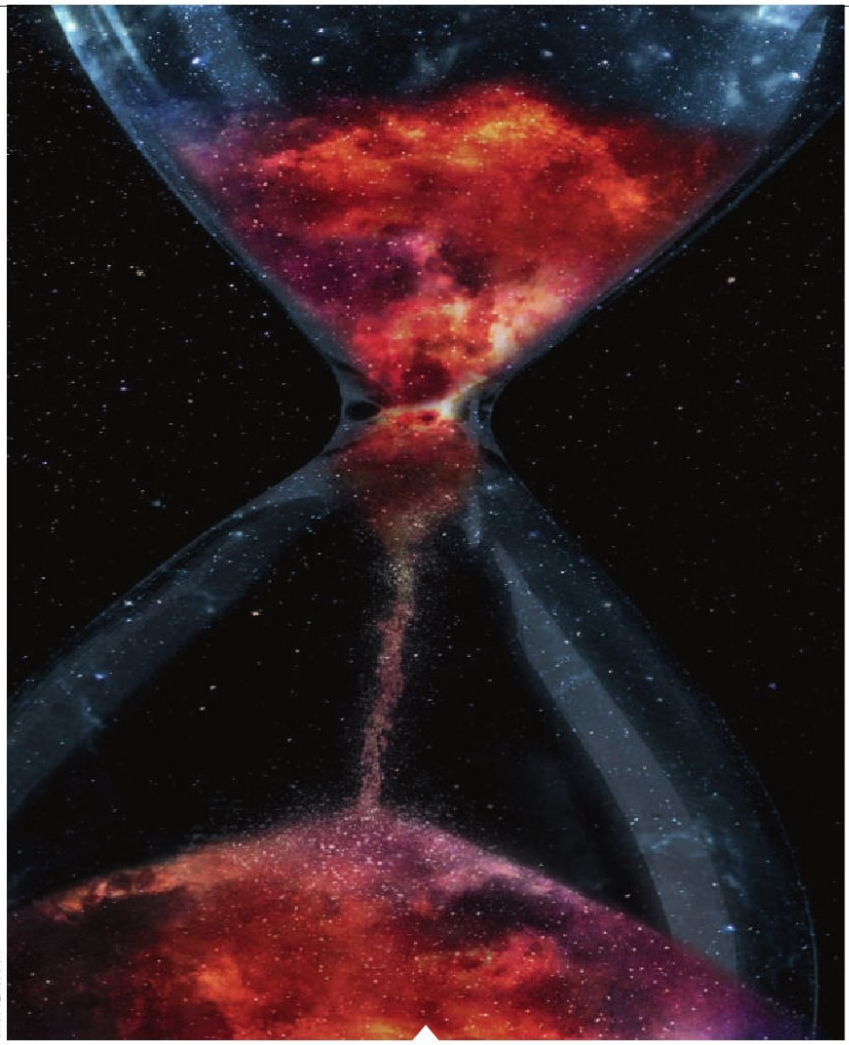


ULIEN FAURE/LEEXTRA/OPALE

« La question de l'essence du temps a été abandonnée par les physiciens et les philosophes »

Ainsi, un peu naïvement, j'ai envie de demander à l'auteur de quel temps il est question. Est-ce celui de la relativité générale où, inséparable de l'espace, il apparaît comme un constituant propre de l'Univers, au même titre que la matière et l'énergie? Ou est-ce le temps-paramètre, celui de la physique quantique, représenté par la variable « t » dans l'équation de Schrödinger décrivant l'évolution d'une particule, et qui n'est ni plus ni moins que le temps absolu, newtonien? Il apparaît d'autant plus nécessaire de définir le concept de temps que certaines tentatives pour fondre la relativité générale et la physique quantique en une théorie globale envisagent sa disparition pure et simple. Alors je m'interroge : à quoi peut se ramener l'idée de temps? à celle de changement? à celle d'ordre? d'irréversibilité [impossibilité de revenir dans le temps] ? d'asymétrie [le temps ne s'écoule que dans un sens] ? Comme ce genre d'interrogation demeure sans réponse en physique, je me suis efforcé, dans *Le Temps du monde*, de reprendre la vieille question, abandonnée par les physiciens mais tout autant par les philosophes, de l'essence du temps.

J'avais quelquefois rencontré cette question dans mon parcours philosophique, mais sans y consacrer un ouvrage. J'en ai éprouvé le besoin après la lecture de



SHUTTERSTOCK

Toute définition du temps semble vouée à l'échec car elle doit s'appuyer sur des idées elles-mêmes temporelles : changement, permanence, antériorité, succession, etc.

l'autobiographie du philosophe Rudolf Carnap (1891-1970) qui relate une discussion avec Albert Einstein vers la fin de la vie du physicien. Einstein lui confiait être préoccupé par le problème du « maintenant ». Car « maintenant » a une signification essentielle pour nous, c'est la condition même de notre expérience du monde. Seulement, il semble que la physique ne peut pas en rendre compte — ce que le savant regrettait. Cette inquiétude d'Einstein a été ma boussole dans ma quête d'une définition du temps.

Or, toute définition du temps semble vouée à l'échec parce qu'elle doit s'appuyer sur des idées elles-mêmes temporelles : changement, permanence, antériorité, succession, etc. J'ai contourné le problème en m'appuyant sur l'idée de « maintenant » que je considère comme un élément clé du concept de temps. À mon sens, c'est même le « moteur du temps ». Le « maintenant », ce n'est pas exactement le présent. C'est quelque chose de plus précis, de plus étroit, et chercher à le définir mène au mystère propre au « maintenant ».

Une idée commune veut que le présent change tout le temps. Mais pour qu'on puisse dire qu'une chose quelconque change, il faut qu'on puisse s'y référer ; il faut qu'elle soit toujours elle-même et donc que, en un autre sens, elle ne change pas. En outre, le présent se distingue du passé (et du futur) mais le « maintenant » ne se distingue de rien d'autre que de lui-même. Son contenu est toujours autre que lui-même sans jamais changer à proprement parler. Cela me mène au « principe d'altérité », que j'oppose au principe d'identité.

Le « maintenant » est au cœur du mystère de l'existence

Toute entité du monde obéit au principe d'identité : pour qu'une chose existe, il faut qu'elle soit et demeure elle-même. Cela paraît évident. Mais le « maintenant » échappe à ce principe : il ne peut pas être lui-même, sinon il ne serait pas. Or, si le « maintenant » n'existait pas, rien n'existerait, car exister, c'est exister maintenant. Toutes les choses obéissent au principe d'identité, à la condition que le « maintenant » obéisse, lui, au principe contraire : le principe d'altérité.

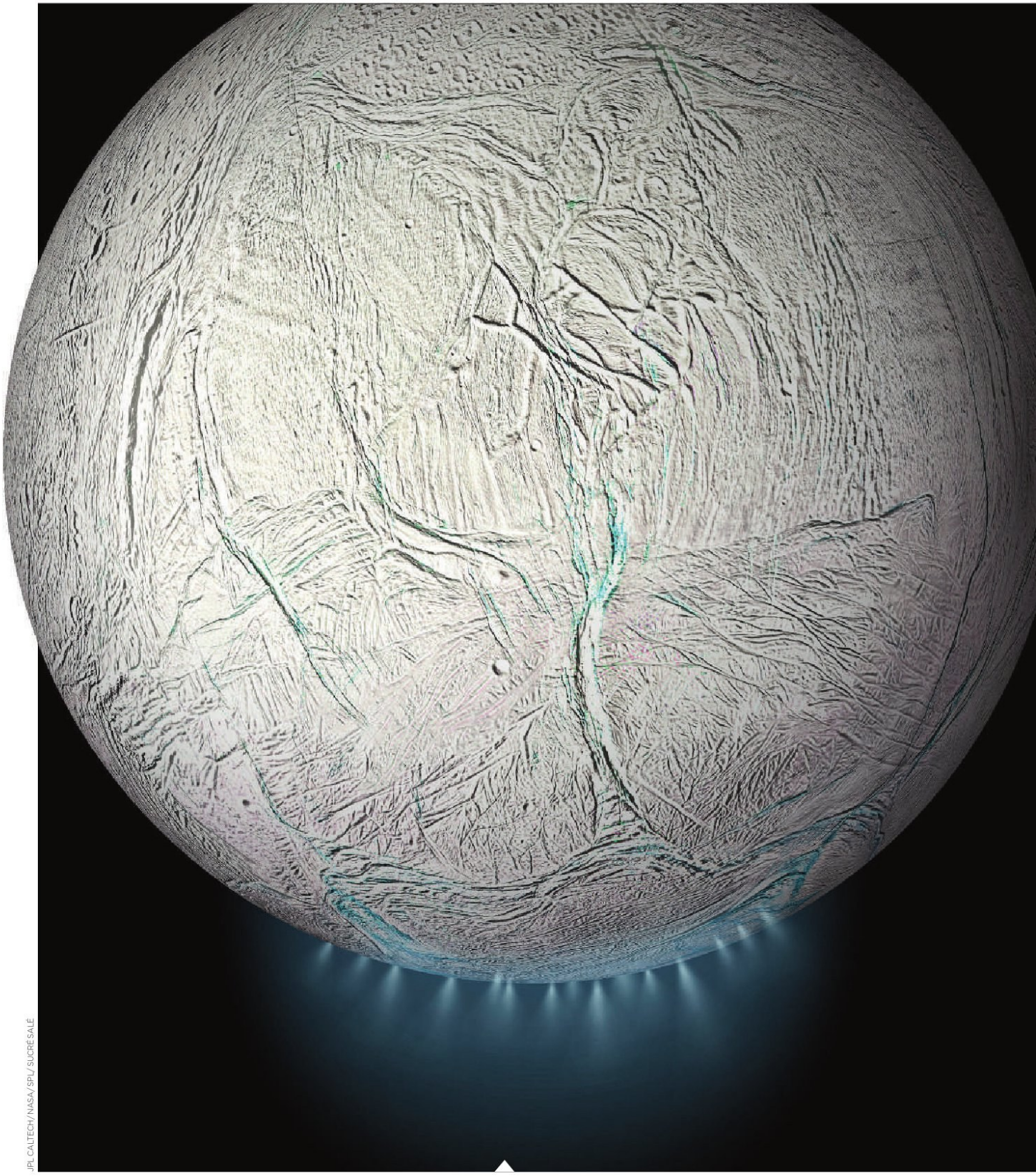
Le mystère du « maintenant » qui chagrinait Einstein était au fond le mystère même de l'existence : tout ce qui est dit exister suppose l'existence du « maintenant ». En tout point de l'espace-temps, il y a un maintenant qui s'altère. C'est ce qui seul existe car le maintenant se confond avec l'existence. Einstein nous a débarrassés du mirage de la simultanéité et donc d'un présent universel, mais il ne pouvait pas nous libérer du « maintenant ». Il ne pouvait que le diffracter à l'infini selon une infinité de « temps propres ».

C'est ainsi que, en conclusion de ma longue enquête philosophique sur l'essence du temps, je reviens finalement à Einstein. Il est vrai que de nombreuses théories philosophiques du temps élaborées depuis l'Antiquité sont mortes. Mais il me semble, et j'ai essayé d'en faire la démonstration, qu'il peut y avoir encore quelque chose de vivant dans l'analyse philosophique du concept de temps. » ■ **Propos recueillis par F. N.**

@fnicot07

POUR EN SAVOIR PLUS

▸ **Le Temps du monde,** Francis Wolff, Fayard, 272 p., 20,90 €



JPL CALTECH/NASA/SPL/ SUCRE SALÉ

Découverts par la sonde Cassini, des dizaines de geysers situés au pôle sud d'Encelade — là où la croûte glacée n'atteint que 5 km d'épaisseur — expulsent de l'eau sous forme de vapeur et de glace ainsi que différents composés (illustration de la Nasa à partir des données de Cassini).

Encelade

Nouvel eldorado de la recherche d'une vie extraterrestre

Ce satellite de Saturne abrite un gigantesque océan sous sa surface gelée. Ses geysers géants, perçant l'épaisse couche de glace, expulsent les mêmes éléments chimiques de base qui composent majoritairement les organismes vivants. Une découverte fascinante qui incite à planifier des missions d'exploration pour percer les secrets de cette lune océan.

Par Franck Daninos @fdaninos

C'est un monde fascinant situé à 1,3 milliard de kilomètres de la Terre, aux abords de Saturne, qui se dévoile peu à peu à la communauté scientifique. Et suscite désormais les espoirs les plus fous : celui d'élucider certains mécanismes qui auraient permis à la vie d'émerger sur notre propre planète… et d'y déceler peut-être les premières formes de vie extraterrestre. Dénommé Encelade, ce satellite de Saturne, découvert au XVIIIe siècle, apparut longtemps anodin et incompatible avec le vivant : un astre de seulement 500 km de diamètre, soit la distance Paris-Lyon, couvert d'une épaisse couche de glace où les températures extrêmement élevées avoisinent -200 °C. Mais grâce à la sonde américaine Cassini, qui l'a survolé une vingtaine de fois avant d'achever sa mission en 2017, les astronomes se sont rendu compte qu'Encelade abritait un gigantesque océan sous sa surface gelée. Alimenté sans doute par des cheminées hydrothermales, comme celles qu'on trouve sur Terre au niveau des planchers océaniques, cet environnement aquatique contient, outre des sels, une variété de substances chimiques ainsi que des composés organiques complexes comprenant jusqu'à une centaine d'atomes. Or en juin, de nouvelles analyses ont révélé qu'il renfermait aussi du phosphore *(lire l'encadré p. 46)* : le seul et le plus ▸

BIOCHIMIE

Le dernier des « Chnops »

Parmi les éléments qui composent majoritairement les organismes terrestres — carbone (C), hydrogène (H), azote (N), oxygène (O), phosphore (P) et soufre (S), formant l'acronyme Chnops — le phosphore est le seul qui n'avait pas encore été décelé sur Encelade. Dans la biochimie terrestre, c'est certes le plus rare de ces six éléments. On le trouve toutefois dans les membranes des cellules, les molécules d'ADN, ou encore la molécule d'ATP, source d'énergie pour toute la machinerie cellulaire. *« Le phosphore est indispensable pour expliquer la vie telle que nous la connaissons »*, résume le biologiste Régis Ferrière. Mais l'analyse de neuf particules de glace, captées il y a une dizaine d'années par la sonde Cassini au-dessus d'Encelade, complète à présent ce panel. Elle montre que ces grains contiennent du phosphore (sous forme de phosphate de sodium). Et cent fois plus que dans les océans terrestres !

rare des six éléments qui, avec le carbone, l'hydrogène, l'azote, l'oxygène et le soufre, composent majoritairement les organismes vivants terrestres, n'avait pas encore été détecté sur cette lune ! *« Même si rien ne prouve qu'Encelade est habitée, c'est l'astre qui réunit les meilleures conditions d'habitabilité à l'exception de notre planète. Pour les agences spatiales américaine et européenne, il est devenu une cible prioritaire en exobiologie »*, s'enflamme Caroline Freissinet, astrobiologiste au Laboratoire atmosphères et observations spatiales du CNRS et de l'université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines.

Un océan de 50 à 60 km de profondeur

La découverte d'un réservoir d'eau liquide à une distance si importante du Soleil et dans un corps aussi petit qu'Encelade a été considérée comme une énorme surprise. Son existence commença à être trahie dès le milieu des années 2000, lorsque Cassini survola son pôle sud. Elle observe alors de longues crevasses — baptisées « rayures de tigre » — lardées de geysers crachant de la glace et de la vapeur d'eau salée dans l'espace. Une dizaine d'années plus tard, après plusieurs passages de Cassini à travers ces panaches, mais aussi grâce à diverses mesures sur la rotation, la topographie et le champ gravitationnel d'Encelade, les chercheurs en acquièrent la certitude : cette lune renferme un océan global de 50 à 60 km de profondeur — contre 4 km en moyenne pour les océans terrestres — enfoui sous 35 km de glace à l'équateur et seulement 5 km au pôle sud. *« Selon les modélisations que nous avons réalisées en 2017, les forces de marée de Saturne déforment et malaxent en permanence le noyau rocheux et poreux d'Encelade,* explique Gabriel Tobie, chercheur CNRS au Laboratoire de planétologie et géosciences de Nantes Université. *Les frictions engendrées libèrent ainsi une importante source de chaleur qui empêche l'océan de geler. »* La dissipation de chaleur est par ailleurs légèrement plus intense au niveau du pôle sud. D'où un amincissement plus important de la coquille de glace, permettant à la matière océanique de s'infiltrer et d'être finalement expulsée. *« En analysant ces jets de matière, on peut obtenir des informations sur le contenu de l'océan subglaciaire sans y accéder de manière directe — ce qui serait techniquement hors de portée »*, souligne Olivier Mousis, de l'institut Origines d'Aix-Marseille Université.

Des fumeurs blancs identiques à ceux trouvés sur Terre

Les spectromètres de Cassini ont décelé ainsi des grains de silice et sels de sodium provenant des geysers, preuve que l'océan est en contact avec le manteau rocheux d'Encelade, et non une autre couche de glace sous-jacente. Ces interactions avec un plancher océanique semblable à la croûte terrestre revêtent une importance majeure. C'est grâce à elles, tout d'abord, qu'un cocktail de minéraux et d'ions (sodium, calcium, magnésium…) peut être solubilisé et enrichir chimiquement l'océan. Mais elles permettent aussi des échanges de chaleur avec l'intérieur de l'astre, et potentiellement des remontées d'eau chaude (entre 50 et 100 °C) engendrant des petits « fumeurs » sous-marins. Les instruments de Cassini ont fourni à cet égard des indices particulièrement probants. En détectant de la silice pure, du dihydrogène et même du méthane dans les panaches d'Encelade, ils indiquent qu'un processus hydrothermal est manifestement à l'œuvre sur les fonds océaniques. Ceux-ci *« seraient parsemés de cheminées hydrothermales,* avance Régis Ferrière, de l'Institut de biologie de l'École normale supérieure de Paris. *En particulier, des fumeurs blancs relativement peu chauds et alcalins : les mêmes qui, sur Terre, au niveau des abysses, sont le siège de réactions complexes, concentrent les espèces chimiques dans des microcavités et constituent des oasis de vie. »*

CAROLINE FREISSINET

« C'est l'astre qui réunit les meilleures conditions d'habitabilité, à l'exception de notre planète »

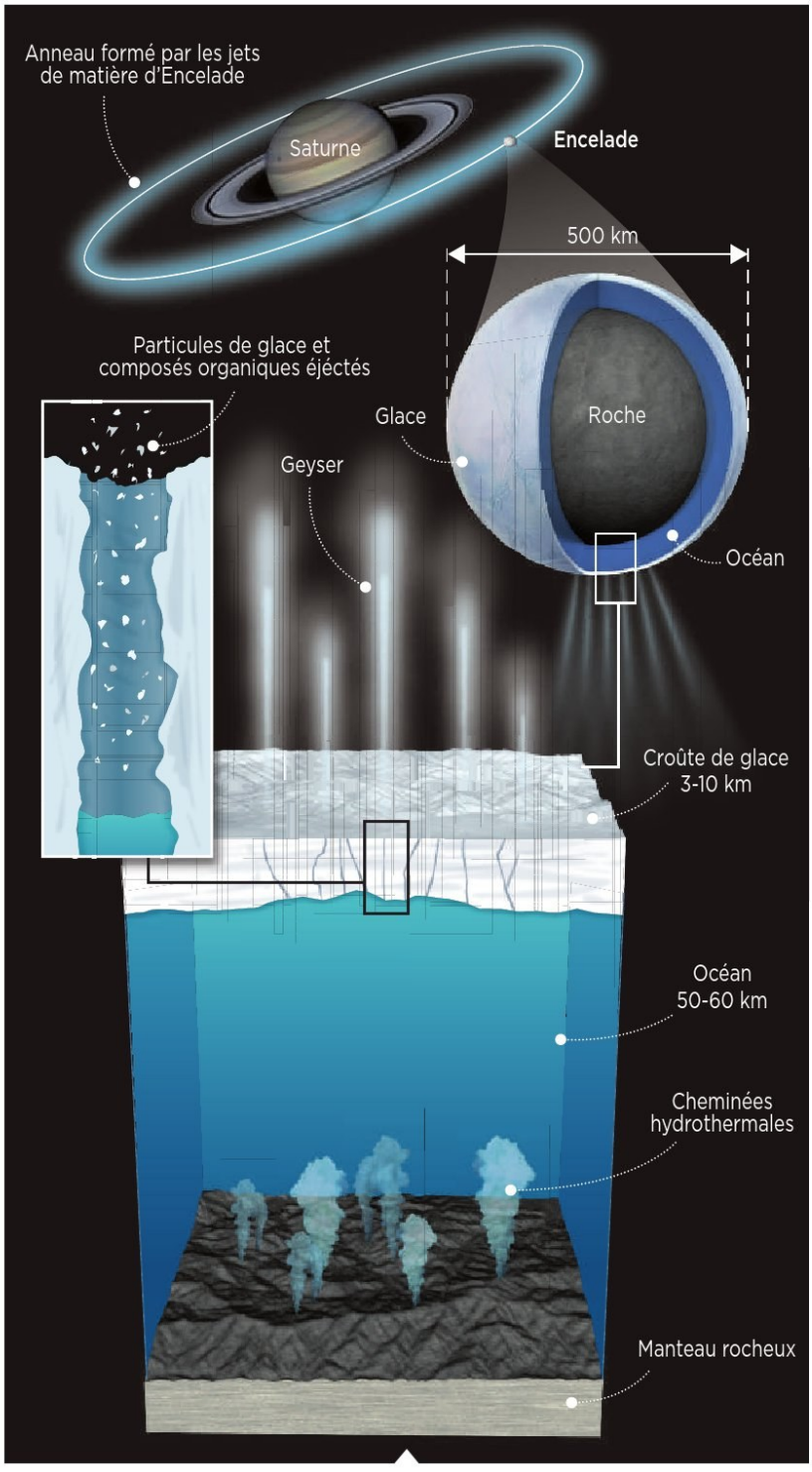
Caroline Freissinet, astrobiologiste au Laboratoire atmosphères et observations spatiales

De l'eau liquide, une source d'énergie, une grande richesse moléculaire et des réacteurs naturels… Les ingrédients que les scientifiques estiment essentiels pour l'apparition de la vie pourraient être ainsi réunis ! Demeure toutefois une grande inconnue : on ignore toujours l'âge d'Encelade et depuis quand son océan s'est stabilisé. Selon certains chercheurs, cette lune pourrait être âgée de seulement 500 millions d'années, ce qui aurait laissé peu de temps à la vie pour éclore et se développer ; d'autres estiment qu'elle se serait formée en même temps que la Terre et le Système solaire lui-même, il y a 4,5 milliards d'années. *« En l'état des connaissances actuelles, il est impossible de trancher »*, reconnaît Gabriel Tobie.

Un terrain de jeu exceptionnel pour les scientifiques

Mais Encelade, dans tous les cas, constitue un terrain de jeu exceptionnel pour les scientifiques. Si son océan est récent, il pourrait permettre des avancées spectaculaires en chimie prébiotique. En identifiant des processus autocatalytiques et des macromolécules organiques, par exemple, ou encore des embryons de membranes isolant certaines molécules du milieu extérieur : *« Les étapes intermédiaires, en somme, entre l'inerte et une chimie du vivant »*, envisage Olivier Mousis.

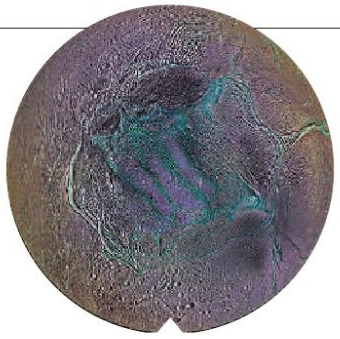
Et si l'océan d'Encelade est âgé de plusieurs milliards d'années, des scénarios encore plus excitants apparaissent possibles… Fin 2022, une équipe française a ainsi calculé que les quantités de méthane mesurées par Cassini s'expliquaient plus facilement par la présence de micro-organismes que des processus purement géologiques. *« Il pourrait s'agir d'organismes dits extrêmophiles et unicellulaires, semblables aux archées qui auraient évolué sur la Terre primitive il y a plusieurs milliards d'années »*, détaille Régis Ferrière, coauteur de ces travaux. Ils utiliseraient le gradient électrochimique entre l'intérieur des sources hydrothermales, où le milieu est alcalin (basique), et l'eau plutôt acide ▸



Les éléments qui composent l'océan d'Encelade (eau, sels, composés organiques) remontent depuis le plancher océanique jusqu'à la croûte de glace où ils s'infiltrent avant d'être expulsés sous forme de geysers. Une partie reste dans l'espace, alimentant ainsi un des anneaux de Saturne.

qui les entoure. Même en l'absence de lumière, ce gradient constituerait une source d'énergie assez importante pour transformer le dihydrogène et le dioxyde de carbone en méthane… et alimenter ainsi un métabolisme rudimentaire. La biomasse totale resterait de fait très modeste : pas plus de 10 tonnes de carbone d'origine biologique, soit l'équivalent d'une seule baleine dans tout l'océan d'Encelade. « *Mais les biomolécules seraient produites en quantité suffisante pour être expulsées par les geysers et détectées par une sonde, pourvu que celle-ci collecte un dixième de millilitre de matière océanique* », s'enthousiasme Régis Ferrière.

Comment aller plus loin et percer les secrets de cette lune océan ? Limités par leur résolution et l'effet de voile de l'atmosphère terrestre, les télescopes au sol actuels ne joueront qu'un rôle marginal dans la poursuite de l'enquête. Seul le nouvel observatoire spatial James-Webb, orbitant à 1,5 million de kilomètres de la Terre et doté d'instruments superpuissants, pourrait permettre certaines avancées. Les résultats de ses premières observations d'Encelade ont été communiqués récemment, en juin. Ils montrent que « *les panaches s'étendent sur près de 10 000 km — 20 fois le diamètre de cette lune* », s'émerveille Guillaume Cruz-Mermy, du Laboratoire géosciences Paris-Saclay, qui a participé à l'étude. Et que les jets de matière sont expulsés à la vitesse de 2000 km/h, libérant chaque seconde 300 litres de glace et de vapeur d'eau. La majorité retombe sous forme de grains de glace nanométriques sur la surface. Mais une petite partie reste dans l'espace. Elle forme une sorte de tore autour de l'orbite d'Encelade, a visualisé le James-Webb, et alimente en particules glacées l'un des anneaux les plus périphériques de Saturne (l'anneau E). Dans ces panaches, seules des molécules d'eau ont été néanmoins décelées par le James-Webb. « *Mais ce ne sont que des résultats préliminaires, fruits de quatre minutes d'observation* », avertit Guillaume Cruz-Mermy. Car d'ici au printemps ou à l'été 2024, plus de trois heures du temps d'observation du James-Webb devraient être consacrées à Encelade. « *Durant cette période,* poursuit le chercheur, *le télescope détectera peut-être des amines, des sulfates, du peroxyde d'hydrogène ou des composés carbonés. Mais aussi d'éventuelles variations de l'activité des panaches, très précieuses pour mieux les modéliser.* »



NASA/JPL-CALTECH

Baptisées « rayures de tigre », les quatre crevasses visibles au pôle sud d'Encelade font 130 km de long.

Des projets de mission pour succéder à Cassini

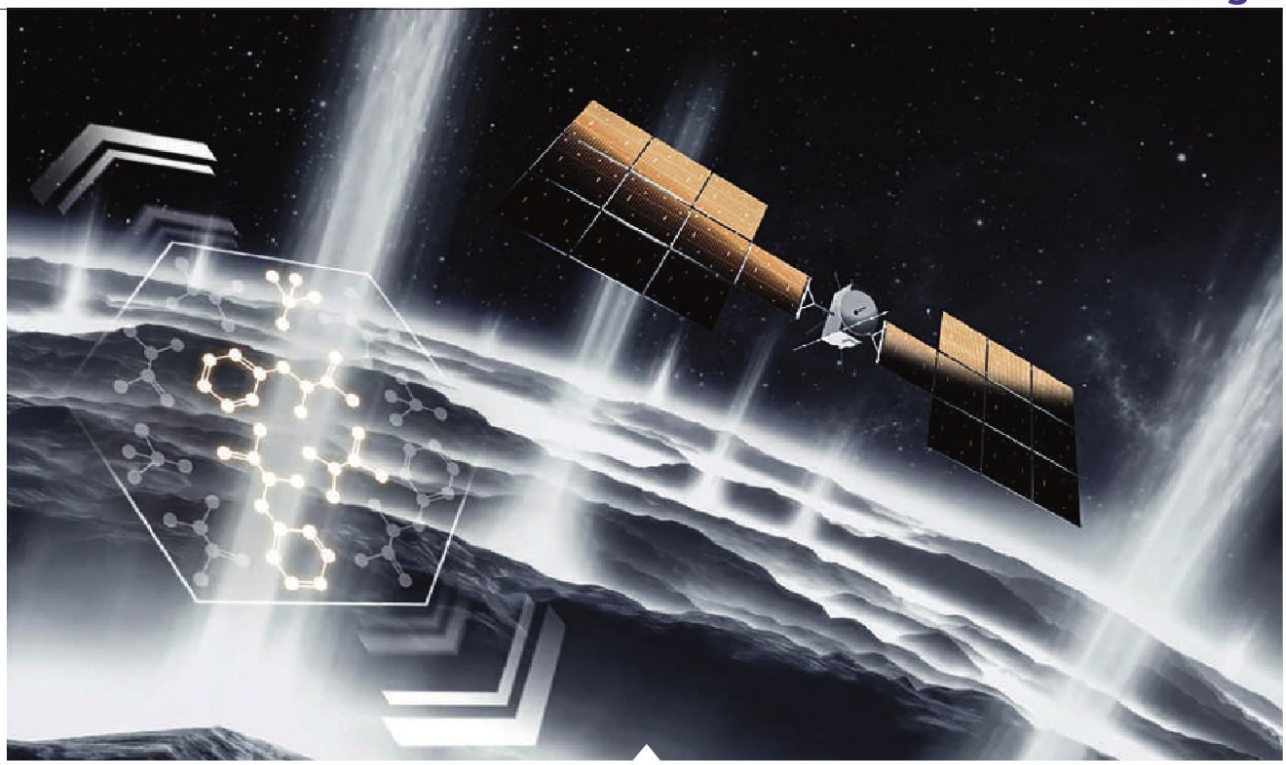
Les experts sont néanmoins formels : pour caractériser plus précisément l'océan d'Encelade et déceler les possibles ingrédients d'une chimie prébiotique voire des biomolécules, il faudra nécessairement des mesures très fines, *in situ*. Les scientifiques pressent donc les grandes agences spatiales afin qu'elles financent et mettent sur pied les successeurs de Cassini. « *Les instruments de cette sonde avaient été conçus dans les années 1990,* rappelle Olivier Mousis. *Ils n'étaient en outre pas optimisés pour l'analyse de molécules organiques, puisque personne n'imaginait*

EXOGÉOLOGIE

Une place à part dans les lunes océans

Encelade n'est pas la seule lune du Système solaire à héberger un océan subglaciaire. Au moins quatre autres possèdent cette propriété : Titan, qui, comme Encelade, orbite autour de Saturne ; ainsi qu'Europe, Ganymède et Callisto, satellites de Jupiter.

« *Toutes ne sont pas aussi intéressantes pour l'exobiologie* », souligne le planétologue Gabriel Tobie. Car sur Titan, Ganymède et Callisto, les fonds océaniques seraient en contact avec une autre couche de glace et non un manteau silicaté, réduisant les échanges chimiques entre la partie rocheuse et l'océan. Une activité hydrothermale reste néanmoins possible et rien n'interdit la mise place d'une chimie complexe. Mais l'imposante épaisseur de glace recouvrant l'océan (de 50 à 100 km pour ces trois lunes, contre quelques kilomètres pour Encelade au pôle sud) rend peu probable la détection de constituants océaniques. Les conditions semblent en revanche beaucoup plus favorables sur Europe : elle possède un plancher océanique rocheux et exhibe de nombreuses régions où sa surface serait couverte de sels provenant de l'océan. Cette lune expulse, par ailleurs, des panaches d'eau de 200 km de haut, visualisés entre 2012 et 2016 par le télescope Hubble. « *Tout porte à croire qu'Europe réunit les mêmes conditions d'habitabilité qu'Encelade, même si aucune sonde n'a pu encore le confirmer ni le détailler* », précise Gabriel Tobie. Deux orbiteurs — l'un européen (Juice), l'autre américain (Europa Clipper) — la rejoindront cependant au début des années 2030 pour l'examiner au plus près.



O. MOUSIS ET AL.

Plusieurs projets de mission européens envisagent de traverser les panaches d'Encelade à de nombreuses reprises afin d'identifier de nouveaux composés organiques et mieux comprendre la formation de cette lune (illustration).

qu'Encelade abritait un océan et pouvait être habitable. Des spectromètres à la fois plus spécifiques et plus performants révéleraient ainsi, sans nul doute, une profusion de nouveaux composés. » Plusieurs projets de mission ciblant Encelade et qui seraient dotés de ces technologies de pointe ont été soumis à l'Agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre de son futur programme d'exploration « Voyage 2050 ». L'un d'eux est porté par Olivier Mousis et des dizaines de planétologues européens. Objectifs : traverser les panaches d'Encelade au moyen d'une sonde, à une quarantaine de reprises, afin d'y quantifier les molécules clés, cartographier le pôle sud et glaner des informations sur la genèse de cette lune. Les recommandations de l'ESA devraient être annoncées courant 2024 pour des missions coûtant 900 millions d'euros.

Gratter la surface pour y débusquer les marques du vivant

Au moins cinq projets analogues seront proposés d'ici à 2026 pour les missions New Frontiers de la Nasa, à 850 millions de dollars. *« Soit un tiers des initiatives américaines de ce type pour l'exploration du Système solaire. Un indicateur de l'énorme engouement que suscite Encelade »*, signale Caroline Freissinet. Mais dans son rapport décennal sur les sciences planétaires, publié en 2022, le Conseil américain de la recherche a d'ores et déjà recommandé que la prochaine mission à très gros budget de la Nasa (5 milliards de dollars), après celle qui s'envolera vers Uranus en 2035, mette le cap sur Encelade. Baptisée « Orbilander », elle devrait décoller vers la fin des années 2030. Une fois en orbite autour d'Encelade, l'engin de six tonnes traversera plusieurs centaines de fois ses panaches… puis il atterrira à proximité des geysers afin d'y gratter la surface, prélever des échantillons et les analyser. Il ne s'agira alors plus seulement de caractériser l'habitabilité d'Encelade, mais de débusquer les marques du vivant. *« La suite instrumentale visera à détecter des distributions particulières de molécules, acides aminés ou lipides, par exemple, mais aussi des dynamiques moléculaires et même des morphologies ressemblant à celles de cellules »*, confie Caroline Freissinet qui participe aux préparatifs. Depuis les sondes Viking qui s'étaient posées sur Mars en 1976, ce serait la première fois qu'une mission cherche à identifier les preuves d'une vie active sur une autre planète. ■

> « Des spectromètres plus spécifiques et plus performants révéleraient, sans nul doute, une profusion de nouveaux composés »
>
> **Olivier Mousis,** directeur de l'institut Origines, Aix-Marseille Université

L'empreinte carbone, face cachée de l'IA

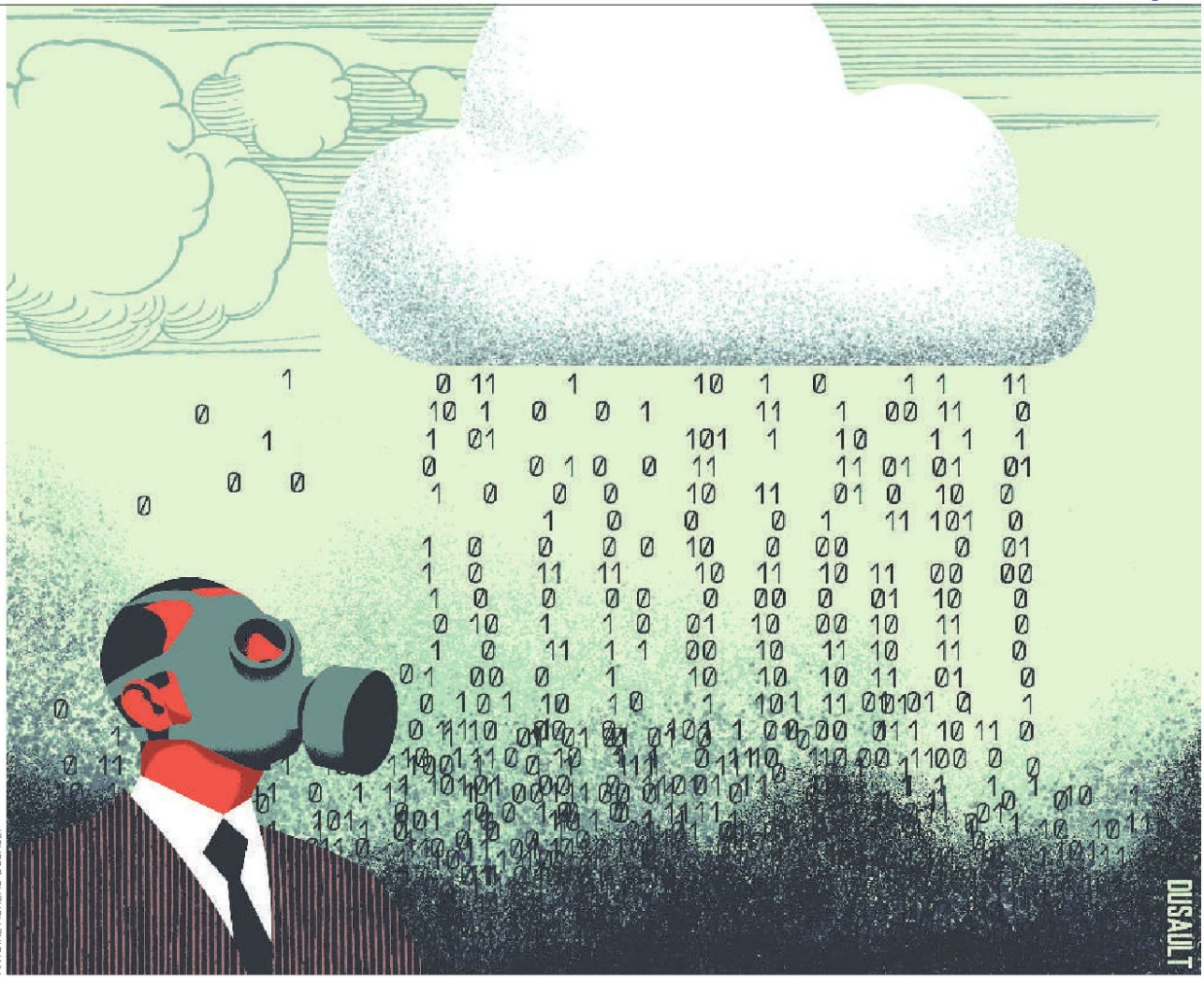
Une technologie aussi abstraite que l'intelligence artificielle a des effets très concrets en matière d'impact carbone. Plusieurs programmes de recherche tentent de comparer les différents modèles d'apprentissage des algorithmes, avec une question cruciale pour le développement du numérique : faut-il limiter des technologies trop énergivores ?

Demandez à ChatGPT quelle a été l'empreinte carbone des calculs nécessaires à son entraînement et vous obtiendrez cette réponse : « *L'estimation de l'empreinte carbone pour l'entraînement de modèles comme GPT-3 était d'environ 284 tonnes de CO_2, selon un article de recherche publié par OpenAI. Cela est comparable à l'émission de CO_2 de la consommation d'énergie de 5 voitures américaines moyennes tout au long de leur durée de vie.* » Certains crieront au scandale énergétique, d'autres minimiseront. Avant de conclure trop vite, il faut revenir à la source du calcul. La plupart des recherches sur l'impact carbone de l'intelligence artificielle (IA) se focalisent sur la phase de l'entraînement, où les algorithmes tournent pendant des jours, des semaines pour apprendre des règles statistiques à partir de jeux de données. Le travail fondateur en la matière est dû à des chercheurs de l'université du Massachusetts à Amherst (États-Unis) en juin 2019. Il portait sur la phase d'apprentissage de quatre modèles de langage : Bert, conçu par Google en 2018, GPT-2 (OpenAI, 2019), Transformer (Google Brain, 2017) et ELMo (Allen Institute for AI, 2018). En entraînant eux-mêmes ces algorithmes pendant une journée et en se reposant sur diverses informations contenues dans les articles consacrés à chacun des modèles, ils ont en effet établi qu'un seul modèle de langage pouvait atteindre l'empreinte carbone de cinq voitures. Mais il ne s'agit que d'estimations basses puisqu'elles ne concernent que les versions finales des algorithmes. Toutes les précédentes, jugées pas assez performantes, ont elles aussi donné lieu à des phases d'entraînement, non comptabilisées ici. Surtout, il s'agit d'informations sur des travaux de recherche datant d'il y a cinq ans, quand la plupart des chercheurs alertent sur une augmentation de la puissance — donc de la consommation énergétique — des modèles.

2 à 6 %
des gaz à effets de serre seraient dus au numérique.

552
tonnes d'équivalent CO_2 ont été émises par l'entraînement de GPT-3.

Très impliquée dans les dimensions éthiques de l'IA, la société américaine Hugging Face a contribué à évaluer les émissions de CO_2 du premier grand modèle de langage libre et ouvert, Bloom, dont elle a lancé le développement. Publié en novembre 2022, l'article de recherche arrive au chiffre de 24,69 tonnes d'équivalent CO_2 générées par l'entraînement. Mais si on y ajoute la fabrication des équipements informatiques utilisés et le déploiement du programme, le bilan monte à 50,5 tonnes. Soit légèrement plus que les 49,43 tonnes de 60 vols Londres-New York, selon le cal-



ANTOINE MOREAU-DUSAULT

culateur en ligne CarbonFootprint servant de référence aux auteurs. Sachant que pour limiter les émissions, l'algorithme a été entraîné sur le supercalculateur Jean-Zay du CNRS, la France fournissant une électricité essentiellement décarbonée, issue du nucléaire. *« La plupart des gens ne se rendent pas compte qu'une technologie aussi abstraite que l'IA a des conséquences physiques,* reconnaît Sasha Luccioni, chercheuse chez Hugging Face sur les sujets d'IA et climat. *Il y a beaucoup à faire pour éveiller les consciences sur le sujet.* » En février, cette Canadienne cosignait une étude concernant le type d'électricité utilisée par divers algorithmes d'apprentissage automatique (traduction automatique, classement d'images, chatbot…). Sur 95 outils, 73 ont été entraînés en utilisant une électricité fabriquée principalement par du charbon, du gaz naturel et du pétrole. En moyenne, les algorithmes qui ont tourné grâce au pétrole et au charbon ont émis respectivement 453,6 et 512,3 g équivalent CO_2 par kilowattheure, au lieu d'un peu plus de 100 avec l'hydroélectricité.

Membre du Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille, Romain Rouvoy a participé à la création d'une application capable d'évaluer le coût énergétique d'un programme informatique, y compris les modèles d'IA *(lire l'encadré p.53). « On constate que dans ses premières itérations, la précision d'un modèle n'est pas toujours optimale mais le coût énergétique est raisonnable,* explique le chercheur. *Or si on veut augmenter la précision de 10 %, il faut dou-*

INRIA

« Si on veut augmenter de 10 % la précision d'un modèle d'IA, il faut doubler ce qui a été consommé jusque-là. C'est exponentiel »

Romain Rouvoy, membre du Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (Cristal)

INRIA

3 QUESTIONS À

JACQUES SAINTE-MARIE
DIRECTEUR DU PROGRAMME ENVIRONNEMENT ET NUMÉRIQUE D'INRIA

« Le développement du numérique n'est pas tenable à son rythme actuel »

L'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria) a créé un programme de recherche intitulé Environnement et numérique. Quel en est le contexte ?
Nous étudions les impacts environnementaux du numérique depuis plus de dix ans mais le sujet occupe l'actualité depuis trois ou quatre ans seulement. Ce sont des impacts déportés, que l'on ne voit pas lorsque nous ouvrons notre ordinateur, et jusque-là le discours dominant portait sur les effets positifs du numérique, notamment grâce à la dématérialisation. Or, les bouleversements climatiques, les questions écologiques poussent à se demander si le développement du numérique est tenable au rythme qu'il a actuellement. Pour nous, à Inria, la réponse est non. Pour des raisons de faible taux de recyclage, d'empreinte énergétique, de disponibilité des terres rares…

De quoi est fait ce programme, exactement ?
De travaux, d'une part, sur le numérique comme moyen d'aider à la décarbonation d'autres secteurs (mobilité, industrie, agriculture), et d'autre part sur la réduction de l'impact environnemental du numérique (écoconception, capteurs économes en énergie, etc.). Cela comprend non seulement de la recherche fondamentale (langage de programmation, cryptographie, intelligence artificielle), mais aussi l'étude de l'écosystème dans lequel ces recherches vont s'insérer, la diffusion d'une culture scientifique sur ce sujet, sans oublier l'examen de l'empreinte environnementale de nos propres activités, à nous, chercheurs.

L'intelligence artificielle, très gourmande en énergie, en puissance de calcul, en stockage, est en pleine explosion. Faut-il revenir en arrière ?
Quantifier globalement l'impact de l'IA n'est pas facile, mais freiner l'innovation en la matière n'est pas une solution. Pour l'heure, une IA comme ChatGPT est généraliste, elle répond à beaucoup de questions. Sans doute évoluera-t-on vers des outils dédiés. Par ailleurs un sujet progresse énormément : l'IA frugale. Cela consiste à retirer toutes les données inutiles et se concentrer sur celles qui sont bonnes pour réduire l'impact environnemental de la phase d'apprentissage. Les problèmes d'environnement créent un contexte nouveau. Il faut de la recherche et de l'innovation pour faire de ces contraintes les leviers d'un nouveau modèle de développement. Car dans l'histoire de l'humanité, il n'y a pas de moment de référence qui serait un âge d'or auquel il faudrait revenir. Cela n'existe pas. ■

Propos recueillis par A. D.

bler ce qui a été consommé jusque-là. C'est exponentiel à chaque tentative de grappiller des points de précision. » Avec un impact carbone en conséquence selon la source d'énergie utilisée.

Aucune standardisation dans la méthode de calcul

Or, si les recherches se multiplient, les méthodologies varient d'une équipe à l'autre, sans aucune standardisation. Les divers résultats comptent beaucoup d'angles morts, et sont la plupart du temps difficilement comparables. Si bien qu'il est impossible de donner les véritables chiffres de l'empreinte carbone de l'IA. « *Aujourd'hui, on sait comment déterminer l'empreinte carbone d'un data center, mais on ne sait pas pour l'instant séparer ce qui relève de l'IA du reste au sein de ce data center* », confirme Francis Bach, spécialiste d'apprentissage automatique à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria), à Paris. De plus, obtenir les données nécessaires à l'estimation de l'impact carbone d'un algorithme (temps d'apprentissage, nombre de processeurs, localisation des data centers…) ne va pas toujours de soi.
Sans compter que l'entraînement des modèles ne sera, à terme, que la partie émergée de l'iceberg. Selon les chercheurs de Hugging Face, se servir de Bloom sur une journée reviendrait à rouler sur une distance de 87 kilomètres dans une voiture neuve. Cela n'est déjà pas négligeable à l'échelle d'un utilisateur. Qu'en sera-t-il quand des millions d'internautes, d'entreprises, d'institutions utiliseront des dizaines de fois par jour plusieurs grands modèles de langage, sans parler d'autres applications ? « *L'IA, ce n'est pas que ChatGPT,* complète Francis Bach, *nous l'utilisons tous les jours en naviguant sur Internet : les articles que nous lisons et les vidéos que nous regardons en ligne sont en grande partie sélectionnés par des règles d'IA. On reconnaît des images sur le téléphone, on traduit du texte grâce à l'IA.* »

ANTOINE MOREAU-DUSAULT

« On sait comment déterminer l'empreinte carbone d'un data center, mais on ne sait pas pour l'instant séparer ce qui relève de l'IA du reste »

Francis Bach, spécialiste d'apprentissage automatique à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria)

Même sans qu'il soit possible de le quantifier précisément, l'IA a ainsi un effet démultiplicateur sur l'impact environnemental du numérique en général. Inria a lancé un programme de recherche sur le sujet *(lire l'interview p. 52)*, qui comprend entre autres des travaux sur les moyens de réduire cet impact avec de nouvelles méthodes de développement informatique, le calcul du bilan environnemental d'un logiciel avant son développement, etc. *« D'autres sujets de recherche commencent à émerger sur la contribution du secteur numérique à l'extraction des métaux, à l'épuisement des ressources naturelles, à la création de stress hydrique dans certaines régions du monde »*, relève Benjamin Ninassi, adjoint au responsable de ce programme.

L'augmentation des puissances de calcul, des capacités de stockage, le recours au *cloud computing* — des serveurs distants pour effectuer des calculs ou stocker des données —, qui ont tant contribué à l'essor de l'IA, ne font qu'exacerber ces tendances. *« Avant, l'ingénieur informatique devait faire avec des limites technologiques et optimiser son logiciel pour qu'il tourne sur un serveur,* rappelle Romain Rouvoy. *Aujourd'hui, s'il a un problème de performance, il va demander des ressources supplémentaires à son prestataire en* cloud computing *au lieu de modifier son programme. Le* cloud *entretient l'idée qu'il n'y a plus de limites. »*

De nouvelles pistes pour rendre l'IA plus sobre

Revenir en arrière risque d'être difficile. Pourtant, les pistes ouvrant à de nouvelles pratiques existent. Comme l'« IA frugale », qui privilégie les données pertinentes sur la masse de données. Ou l'apprentissage fédéré, qui permet d'entraîner des modèles sur divers jeux de données sans avoir à centraliser ces derniers, en les laissant sur leur stockage local. Voire revoir à la baisse les objectifs de précision des algorithmes. *« Dans des cas comme le pilotage des voitures autonomes ou des applications médicales, il est inconcevable de ne pas viser la meilleure précision possible,* précise Romain Rouvoy. *Mais les mêmes types de modèles sont utilisés dans beaucoup d'applications moins critiques où une précision moindre serait tout à fait acceptable. »* À l'heure où la perspective d'une IA forte enflamme les imaginations, le vrai avenir réside peut-être dans l'IA sobre. ■ **Arnaud Devillard**

APPLICATION

Évaluer le coût électrique d'un logiciel

Produit d'une collaboration réunissant l'université de Lille et Orange, PowerAPI est une application de mesure de la consommation électrique des logiciels, équivalent d'un wattmètre. *« Elle vaut pour n'importe quel logiciel, sans avoir à modifier techniquement ce dernier,* explique Romain Rouvoy, du Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille. *On le laisse s'exécuter et on regarde comment il se comporte, comment il utilise les ressources de la machine, pour ensuite inférer sa consommation. »* Les architectures matérielles des ordinateurs ne cessent d'évoluer et de se complexifier mais l'application s'y adapte, fournissant de véritables tableaux de bord. Dernière évolution : associer à la mesure de la consommation celle des impacts environnementaux des logiciels, lors de leur conception, leur exécution, mais aussi en maintenance.

MATTHIEU COLIN/HEMISFR

Les lacs salés d'altitude dans le désert d'Atacama, au Chili, contiennent les plus fortes concentrations au monde de lithium. Le groupe français Eramet a mis au point un procédé d'extraction directe du métal des saumures qui permet de limiter les émissions de CO_2.

Lithium

L'immense défi des batteries européennes

Composant essentiel des batteries de nouvelle génération, le lithium est un métal dont l'extraction et le raffinage sont concentrés dans quelques pays. Alors que les ressources minières en lithium en France attirent les convoitises, d'autres entrepreneurs tentent de développer des techniques moins polluantes, comme l'exploitation des saumures géothermales du bassin rhénan. Explications.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

C'est un cri d'alarme qu'a lancé le 19 juin la Cour des comptes européenne. Les auditeurs écrivent dans leur rapport que « *l'Union européenne risque d'échouer à devenir un moteur mondial de l'industrie des batteries* ». Principal écueil : l'accès aux matières premières, et en particulier au lithium. Aujourd'hui, l'Argentine, la Bolivie et le Chili possèdent 58 % des ressources mondiales, soit une concentration jamais vue pour une matière première. Mais c'est sa transformation qui pose le plus problème, du moins pour les pays occidentaux. En 2021, la Chine a raffiné 60 % du lithium produit dans le monde, et représentait 77 % de la capacité de production de cellules de batteries et 60 % de la fabrication de composants de batteries. Comment sortir de ces monopoles bien établis qui profitent d'un élément dont le prix culmine au premier semestre 2023 autour de 60 000 euros la tonne ?

Le lithium est pourtant réparti également dans toutes les couches géologiques de la planète. Selon le rapport que le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) a consacré au potentiel minier de la France (*lire l'encadré p. 57*), on trouve dans toute la croûte continentale supérieure cet élément métallique deux fois moins dense que l'eau, intéressant pour sa forte électronégativité — et donc son aptitude à capter et faire circuler les électrons — et son faible poids par rapport au plomb, qui permet d'alléger les batteries. Mais on le trouve en concentration faible : 35 parties par million (ppm)

en moyenne. Trop faible le plus souvent pour envisager son exploitation. Sauf pour certains silicates bien particuliers, dont le spodumène. *« Cette roche dure est à l'origine d'environ 60 % du lithium produit dans le monde,* détaille Vincent Ledoux-Pedailles, directeur commercial de Vulcan Energy Resources, start-up germano-australienne productrice de lithium en Europe. *Les principaux gisements se trouvent en Australie, où la roche est extraite et broyée, avant d'être exportée vers la Chine pour son raffinage.* » Le spodumène subit alors toute une série d'étapes complexes. Le processus pour obtenir la pureté exigée du carbonate de lithium et de l'hydroxyde de lithium, les deux formes utilisées par l'industrie de la batterie, est très polluant : 170 m^3 d'eau consommés et 150 tonnes de CO_2 émises pour chaque tonne. Selon Vulcan Energy, la production actuelle à partir de spodumène génère tous les ans un milliard de tonnes de CO_2, soit les émissions conjointes du Royaume-Uni, de la France et de l'Italie, du fait notamment que la Chine utilise une électricité à base de charbon.

M. ABBOT T/THE NEW YORK TIMES/ REA

Le spodumène, une roche dure, est une source importante de lithium. Mais le processus de transformation est très polluant (ici en Australie).

Des réserves dans les déserts de sel des hauts plateaux andins

Les autres gisements exploités se trouvent en Amérique latine. Là, 40 % de la production repose sur un tout autre type de structure géologique : les « salars », c'est-à-dire des déserts de sel. *« Ce sont des cuvettes encloses au cœur de la cordillère des Andes où, pendant des millions d'années, des formations salines ont recueilli du lithium provenant de l'érosion des roches par l'eau. À 4000 mètres d'altitude, la forte évaporation produit naturellement les plus fortes concentrations au monde, atteignant dans le gisement chilien de l'Atacama près de 1,2 gramme de lithium par litre de saumure »*, explique Fabien Burdet, responsable de l'activité lithium chez Eramet, groupe minier métallurgique français. À partir de ces saumures, Eramet a développé sa propre technologie d'extraction directe du lithium (DLE, pour *direct lithium extraction*). Ce procédé utilise un adsorbant à base d'alumine, véritable « séparateur à lithium » qui permet ensuite une purification avec des nano-membranes et des systèmes d'osmose inverse, les mêmes qui fonctionnent dans les usines de dessalinisation d'eau de mer. Avantage du DLE : les opérations se font à température ambiante, ce qui diminue la facture énergétique. On n'émet ainsi plus que 50 tonnes de CO_2 par tonne produite, mais la consommation d'eau grimpe à 469 m^3. Principal producteur latino-américain de lithium, le Chili vient d'imposer les nombreuses formules de DLE pour toute sa production.

Objectif de l'Europe : devenir leader mondial de la production

C'est dans ce contexte de dépendance totale d'autres régions du monde que l'Union européenne a défini dès octobre 2017 un plan pour devenir leader mondial de la production et de l'utilisation des batteries durables, c'est-à-dire neutres sur le plan des émissions de gaz à effet de serre. Cette « alliance pour la batterie européenne » vise une intégration de toute la chaîne de valeur, de l'ex-

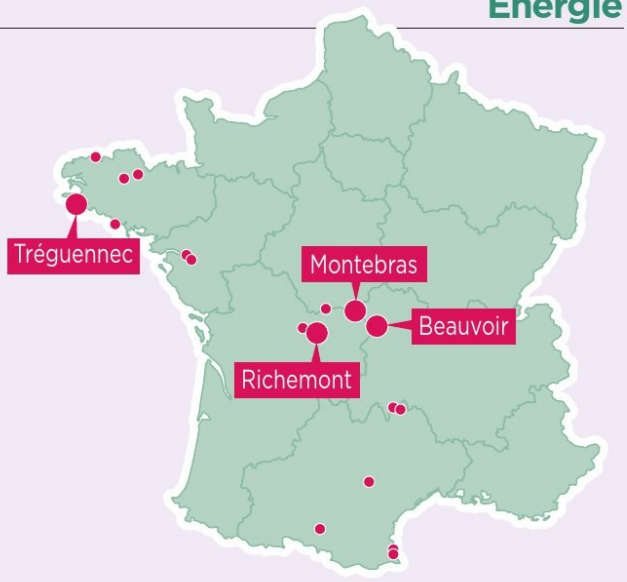
VULCANENERGY

« La haute vallée du Rhin bénéficie d'une structure géologique très rare sur la planète où les teneurs en lithium sont importantes »

Vincent Ledoux-Pedailles, directeur commercial de Vulcan Energy Resources

MINES

Des ressources de lithium importantes en France



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : BRGM

Selon l'étude du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) menée en 2018, La France possède un important potentiel de production de lithium, principalement dans les massifs granitiques de Bretagne et du Massif central. 41 sites de roches dures propices ont été recensés dans l'Hexagone (l'extraction géothermale était exclue de l'étude). Plusieurs ont un fort potentiel : Beauvoir (Allier, 320 000 tonnes), Tréguennec (Finistère, 66 000 tonnes), Richemont (Haute-Vienne, 20 000 t), Montebras (Creuse, 20 000 t). Tous ces sites au passé minier ne pourront pas être exploités, en raison notamment de la nécessaire protection de la biodiversité. Ainsi, celui de Tréguennec est un espace naturel protégé appartenant au Conservatoire du littoral. Le gisement de Beauvoir va cependant être exploité d'autant plus facilement que ce site est une carrière de kaolin utilisée depuis le XIXe siècle pour la céramique et détenue aujourd'hui par Imerys, leader mondial des spécialités minérales pour l'industrie. L'impact environnemental est amoindri par le fait qu'il s'agira d'une exploitation souterraine. 34 000 tonnes d'hydroxyde de lithium par an en sortiront dès 2028, de quoi équiper 700 000 véhicules électriques. La durée d'exploitation est de vingt-cinq ans.

traction du minerai au produit fini et à son recyclage en fin de vie. Ce plan se concrétise notamment par la construction d'usines géantes (« gigafactories ») en Europe, dont l'une a été inaugurée le 30 mai dans le Pas-de-Calais. La partie minière a, elle, fait l'objet d'une étude géologique du territoire européen pour des gisements de roches dures. *« En 2018, les ressources européennes sont estimées à environ 52 millions de tonnes d'oxyde de lithium, soit environ 24 millions de tonnes de lithium métallique et les réserves à environ 660 000 tonnes d'oxyde de lithium »*, affirme ainsi le BRGM dans son rapport. Pour connaître le potentiel minier des 26 États membres, la Commission européenne a établi une liste de 30 « matières premières critiques », poussé à une *« alliance européenne pour les matières premières »* dont la première tâche est de recenser les projets miniers d'ici à 2025. De son côté, le 31 mai dernier, le constructeur automobile Stellantis (qui englobe 16 marques dont Chrysler, Fiat, Peugeot, Citroën ou Opel) a annoncé un partenariat avec Vulcan Energy pour exploiter une nouvelle voie, moins connue mais très prometteuse : les saumures géothermales du bassin rhénan, ressource qui est également en cours d'étude par l'alliance d'Eramet avec le producteur et distributeur local d'énergie Électricité de Strasbourg. « *La haute vallée du Rhin, entre Mulhouse en France et Mannheim en Allemagne, bénéficie d'une structure géologique particulière très rare sur la planète : des saumures présentes entre 3 et 4 kilomètres de profondeur*, s'enthousiasme Vincent Ledoux-Pedailles. *Cette saumure est utilisée pour produire de la chaleur et de l'électricité renouvelable. Or, les teneurs en lithium y sont importantes, aussi nous ambitionnons de capter ce lithium avant de réinjecter la saumure dans sa couche d'origine* ». Avec une seule opération de forage, les exploitants vont ainsi obtenir deux productions différentes.

M. ABBOTT/THE NEW YORK TIMES/ REA

Chlorure de lithium, dont l'extraction géothermale, testée par Vulcan Energy à Insheim (Allemagne), n'émet pas de CO_2.

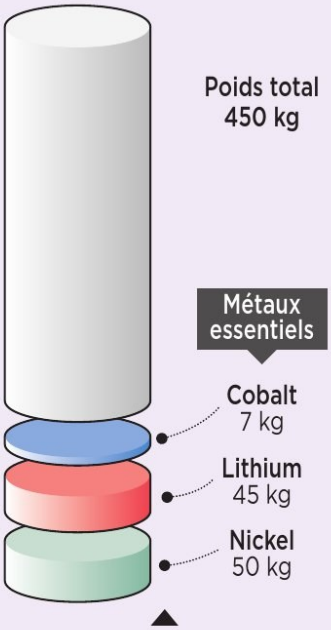
Créé en 2018, Vulcan Energy ne revendique aucune innovation. Ses fondateurs ont simplement constaté une voie vertueuse de production de lithium. La saumure arrive à la surface à une température de 165 °C. L'épuration complète du lithium selon la version DLE utili-

RÉGLEMENTATION

La nécessité de recycler davantage

Le 17 août est entrée en vigueur la nouvelle réglementation sur le recyclage des batteries. Le texte trace une trajectoire d'ici à 2030 que les 26 États membres vont devoir respecter. Le taux de collecte pour les batteries et piles portables doit ainsi passer de 45 % en 2023 (la France y est presque avec un taux de 41 %) à 63 % d'ici à 2027 et 73 % d'ici à 2030. Les batteries des vélos, trottinettes, scooters gyroscopes électriques, qui jusqu'ici n'étaient soumises à aucune obligation, devront être recyclées à 51 % en 2028 et 61 % d'ici à 2031.

Mais il existe toujours plusieurs types de batteries : si les accumulateurs au lithium comptent aujourd'hui pour 63 %, il reste 25 % de piles alcalines. L'objectif final est de récupérer 50 % du lithium d'ici à 2027 et 80 % d'ici à 2031. Les matériaux recyclés devraient resservir à faire des batteries, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui pour des raisons de pureté. Aussi, les objectifs de seuil minimum de contenus recyclés provenant des déchets de fabrication et de la consommation dans les batteries neuves sont-ils modestes : 15 % pour le nickel, 12 % pour le lithium, 26 % pour le cobalt en 2030. La Commission européenne estime que 31 % de la production de lithium pourrait dans les décennies à venir provenir du recyclage.



Dans une batterie de voiture électrique, trois métaux peuvent être recyclés, dont le lithium.

BRUNO BOURGEOIS

sée par l'entreprise nécessite 65 °C de chaleur. Ainsi, le partage s'opère entre les fonctions de production d'énergie géothermale et l'épuration du lithium. Vulcan Energy revendique un lithium « zéro carbone ». *« Selon l'estimation du gisement, nous pensons pouvoir produire de quoi fournir un million de véhicules électriques en batteries par an d'ici à 2030 »*, assure Vincent Ledoux-Pedailles. Vulcan Energy a déposé, dans la région de Mulhouse, une demande de licence exclusive pour sécuriser une zone de 480 km² pour l'exploration du gisement de saumure de la haute vallée du Rhin.

C'est cette même couche géologique que vont exploiter Eramet et Électricité de Strasbourg sur des sites différents. L'accord signé en janvier procède du mariage de deux compétences. Électricité de Strasbourg apporte sa maîtrise des forages géothermaux pour produire électricité et chaleur renouvelables sur son site de Rittershoffen (Bas-Rhin). Eramet fournit son DLE qui est actuellement testé en configuration industrielle sur le site de Centenario en Argentine. *« Cette usine de Centenario qui ouvrira en 2024 va ainsi produire 24 000 tonnes d'hydroxyde de lithium, de quoi équiper 500 000 véhicules électriques avec une empreinte écologique réduite, même si nous ne pouvons pas à ce stade affirmer que nous serons "zéro carbone" »*, détaille Fabien Burdet, qui se veut plus prudent que Vulcan Energy.

Un véritable coup de chance géologique

Le projet rhénan est plus modeste avec une production envisagée de 10 000 tonnes. L'exploitation géothermale de la vallée du Rhin ne bénéficie donc pas des concentrations records des salars d'Amérique latine, mais elle constitue malgré tout un véritable coup de chance géologique. *« Il n'existe véritablement que deux sites dans le monde où les saumures géothermales sont riches en lithium et sont donc exploitables, l'autre étant situé en Californie »*, pondère Vincent Ledoux-Pedailles. Cette ressource nouvelle va en tout cas s'ajouter à la production en roches dures.

L'Europe pourra-t-elle être un jour réellement indépendante en lithium ? Difficile à dire. Cela dépend de la richesse de gisements qui ne sont pas encore totalement évalués, et les ressources ne sont pas connues. Cette autonomie est aussi tributaire des taux de recyclage des batteries usagées. Et cela tient également aux changements dans les besoins de mobilité des Européens. Si la demande continue de s'établir à 15 millions de voitures individuelles par an, telle qu'elle était avant la crise du Covid-19, elle sera trop forte pour les capacités d'extraction. Le secteur des transports ne deviendra pas neutre en carbone simplement en changeant les moteurs thermiques par des électriques. Il faudra aussi réduire le nombre de véhicules en circulation. ■

72H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

LE FESTIVAL

GRAND OCEAN

29-30 SEPT. | **1ER OCT. 2023**

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN

À OMONVILLE-LA-ROGUE

& EN DIGITAL

Conférences & débats portés par les plus grands spécialistes, animations ludiques & immersives... nous accueillons petits et grands pour une plongée unique au cœur des océans.

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

Partenaires Associés

Partenaires

Partenaires Médias

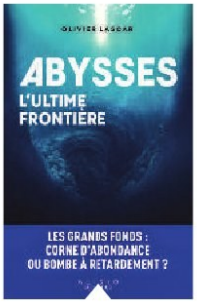
Organisé par

Une plongée éclairante au cœur des abysses

Dans son essai « Abysses, l'ultime frontière », Olivier Lascar nous emmène à la découverte des grands fonds marins. Un monde encore mystérieux qui attise autant la curiosité des scientifiques que la convoitise d'entreprises en quête de ressources minérales prometteuses. En voici quelques extraits.

Une révolution, aux conséquences planétaires. L'exploitation de mines au fond des océans pourrait déstabiliser l'équilibre des abysses. Pour certains, c'est la seule façon d'accéder aux minerais indispensables aux batteries et autres équipements électroniques nécessaires aux énergies de transition. D'autres préviennent : c'est au risque de chambouler encore davantage une Terre déjà si fragilisée. Cette menace est racontée dans le livre *Abysses, l'ultime frontière* du journaliste Olivier Lascar, rédacteur en chef du pôle numérique de *Sciences et Avenir-La Recherche*. Cet ouvrage, dont nous publions ici plusieurs extraits, revient aussi sur les enjeux de l'exploration scientifique d'un environnement qui demeure largement une *terra incognita* pour les scientifiques. ■

Mathieu Nowak @mathieu_nowak



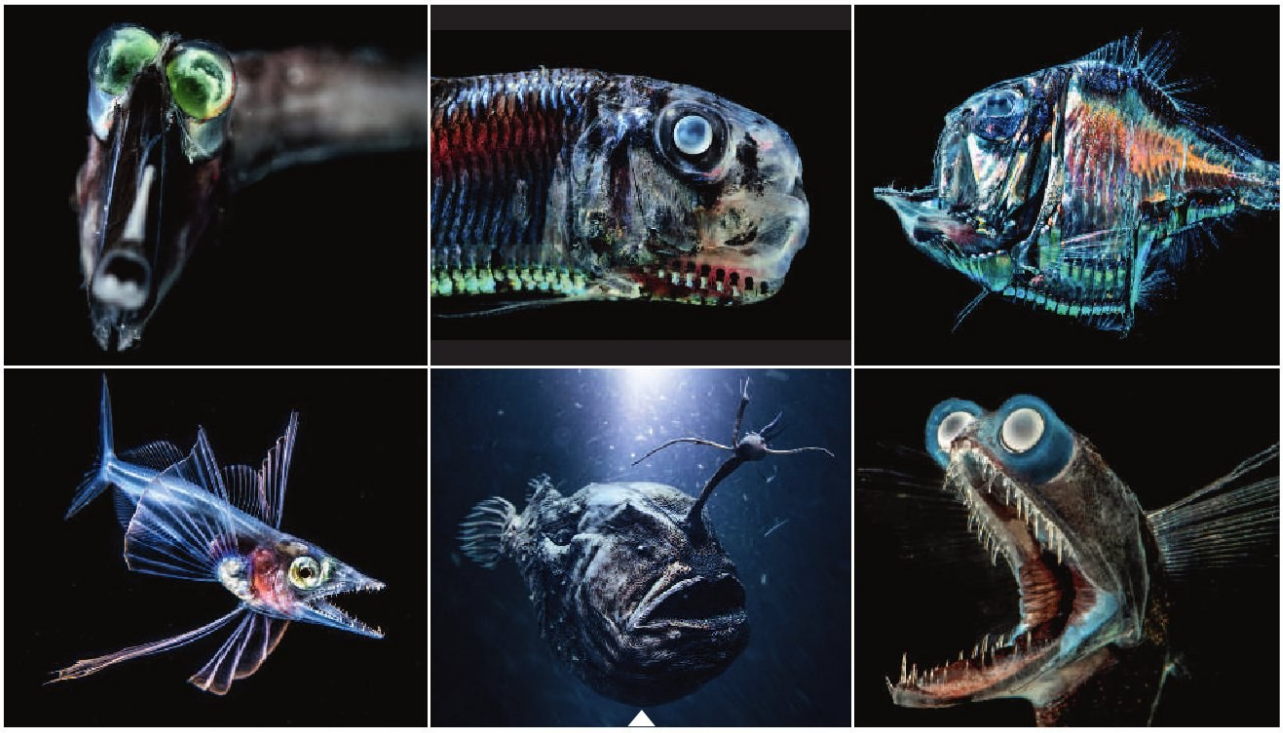
Abysses, l'ultime frontière, Olivier Lascar, Éd. Alisio, 200 p., 19 euros.

On connaît mieux la surface de la Lune que le fond des océans

« […] la plupart des spécialistes parlent d'abysses pour ce qui est en deçà de 1000 mètres de profondeur. Et cela représente une part considérable de notre planète, dont la surface est recouverte à 71 % par les océans. Dans une étude publiée par la Fondation de la mer, il est ainsi précisé que 88 % du plancher océanique est situé au-delà de 1000 mètres de profondeur. […] Immenses par leur superficie, ces grands fonds marins demeurent extraordinairement méconnus, puisque moins de 20 % sont cartographiés et moins de 5 % explorés. […] *Quid* des animaux qui y vivent ? Des ressources minérales ? À force, la formule fait cliché, pourtant c'est vrai : on connaît mieux la surface de la Lune que le fond des océans. À l'exploration scientifique de lever le voile sur ces questions pour percer d'un peu de lumière cette obscurité. »

La découverte des sources hydrothermales

« Découverts à la fin des années 1970, ces « fumeurs noirs » sont des sortes de cheminées qui expulsent de l'eau à très haute température, entre 300 et 400 °C […]. Dans



S. ZANKL / NATUREPL / EBPHOTO - S. ZANKL / NATUREPL / EBPHOTO - DANTÉ FENOLIO / BIOSPHOTO - FABIEN MICHENET / BIOSPHOTO - PAULO DE OLIVEIRA / BIOSPHOTO - DANTÉ FENOLIO / BIOSPHOTO

Les poissons abyssaux arborent une apparence étrange, parfois effrayante. De gauche à droite et de haut en bas : « Stylephorus chordatus » ; « Ichthyococcus ovatus » ; « Argyropelecus aculeatus » ; « Kali macrodon » ; « Himantolophus groenlandicus » ; « Gigantura indica ».

les éléments expulsés, on trouve des sulfures, du méthane, du gaz carbonique… En bref, des ingrédients toxiques pour nous, mais auxquels des organismes vivants de l'extrême se sont parfaitement accoutumés. En l'absence de lumière et d'oxygène, ces oasis de vie prospèrent grâce à la chimiosynthèse : le vivant se perpétue en transformant le minéral en matière organique. [...]

Au début, les océanographes pensaient aussi que la matière contenue dans le panache hydrothermal précipitait à quelques kilomètres à l'aplomb de l'émission. Ils savent désormais que l'expansion latérale des panaches est plus complexe et que la matière peut retomber à une très grande distance au-delà des cheminées. Étudier la façon dont elle arrose le plancher océanique est très intéressant, notamment dans un contexte où l'on parle d'installer des mines dans les grands fonds. *« L'enjeu est d'essayer de quantifier l'export naturel de ces minéraux par une source hydrothermale, pour pouvoir ensuite le comparer avec ce que pourrait apporter une exploitation industrielle »*, commente Pierre-Marie Sarradin, responsable de l'unité mixte de recherche biologie et écologie des écosystèmes marins profonds à l'Ifremer. [...] La découverte de la vie qui pullule autour de ces sites a mis les chercheurs dans une forme de sidération. [...] La plaine abyssale ne compte que quelques grammes de matière vivante par mètre carré de sédiments : à proximité d'un fumeur noir, il s'en niche dans la même surface 40 à 60 kilogrammes !"

Ne pas confondre exploration et exploitation

« La décarbonation de nos industries est sûrement une voie nécessaire pour limiter l'émission des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique, menace létale pour l'humanité, mais le besoin en métaux des énergies de transition doit-il justifier qu'on aille les chercher au fond de l'océan, au risque de perturber un milieu jusque-là inviolé ? Les scientifiques sont, à cet égard, sur une ligne de crête. Car comment savoir où aller chercher ces matériaux, sinon en procédant à l'exploration scientifique des grands fonds ? La recherche, qui désigne les gisements potentiels, est aussi là pour empêcher que quiconque tente de jouer les apprentis sorciers : le rôle des blouses blanches est de clarifier ce qui se passerait si on allait justement prélever ces ressources des grands fonds marins. S'en remettraient-ils… ou pas ? Ainsi, l'exploration scientifique des abysses est à la fois un préalable et un garde-fou de l'exploitation industrielle. *« Le premier enjeu de l'exploration, c'est la connaissance fondamentale du fonctionnement de la Terre,* complète le chercheur Pierre-Marie Sarradin. *Mais le deuxième enjeu, c'est effectivement d'établir l'état des*

RÉCHAUFFEMENT

Le dérèglement climatique jusque dans les abysses

"Conséquence du changement climatique : les abysses se réchauffent, et *« plus vite qu'à mi-profondeur »*, explique Casimir de Lavergne, spécialiste de l'océan profond et océanographe au Locean/IPSL. En effet, la montée de la température dans les abysses est loin d'être négligeable : en dessous de 3000 mètres de profondeur, c'est de l'ordre de 10 % du réchauffement total de l'océan. *« Et la tendance s'accentue d'ailleurs, quand on regarde la quantité de la chaleur qui rentre dans l'océan, de plus en plus, l'océan profond en prend une proportion importante »*, continue Casimir de Lavergne. Jusqu'à récemment, les scientifiques ne voyaient pas pourquoi les grandes profondeurs étaient autant exposées et si vite, même dans le cadre du réchauffement climatique. Désormais, plusieurs études scientifiques suggèrent que ce pourrait être en raison d'un ralentissement des courants profonds en provenance de l'Antarctique. *« Ils paraissent aller moins vite en raison principalement de la fonte de la calotte antarctique. Celle-ci fournit de l'eau douce qui se répand en surface de la région polaire. Les eaux situées sur les marges de l'Antarctique deviennent ainsi moins salées et moins denses. Elles ont en conséquence plus de mal à plonger »*, poursuit le spécialiste. D'où un frein à l'alimentation du profond en eaux froides, et une augmentation de la température abyssale."

ressources potentielles dans ces environnements et d'établir à quelles conditions il est possible d'y avoir recours de façon durable. »"

Le rôle clé de la France

Le 7 novembre 2022, pendant un discours prononcé à Charm el-Cheikh à l'occasion de la COP27 organisée par l'Égypte, le président Emmanuel Macron a affirmé que la France *« soutient l'interdiction de toute exploitation des grands fonds marins »* […]. Notre pays a-t-il les moyens de jouer les locomotives, en se mettant à l'avant-garde de la protection des grands fonds marins ? Oui, et cela en raison du fameux héritage de l'oncle de la Jamaïque, comme le disait Christophe Prazuck, le directeur de l'institut de l'Océan de l'Alliance Sorbonne Université. La convention internationale sur le droit de la mer [de Montego Bay, en Jamaïque] a permis de définir les ZEE [zones économiques exclusives] de chaque pays [...] et celle de la France atteint une superficie de 11 millions de kilomètres carrés : c'est 22 fois la superficie de l'Hexagone ! Cela fait de la France, derrière les États-Unis, le deuxième pays maritime au monde, grâce à nos territoires ultramarins."

THE METALS COMPANY

Les nodules à la surface des fonds marins contiennent des métaux recherchés.

The Metals Company : l'épouvantail

Petit pays d'Océanie économiquement exsangue, Nauru s'est consumé en exploitant jusqu'au trognon ses mines terrestres de phosphate, dont les gisements sont désormais à sec. Seul, il n'aurait pas les capacités technologiques et économiques pour se lancer dans l'exploitation des grands fonds — qu'il considère comme sa dernière chance de survie. Si l'île de Nauru a fait un pas vers l'exploitation minière en 2021, c'est parce qu'elle parraine la société Nauru Ocean Resources Inc. [une filiale en propriété exclusive de la start-up minière canadienne The Metals Company].

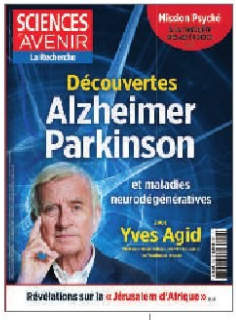
[…] The Metals Company est un nom qui revient en boucle quand on s'intéresse au sujet de l'exploration des grands fonds. Elle est dirigée par le Canadien Gerard Barron, souvent dépeint comme une sorte de Dark Vador des abysses, depuis vingt ans dans le business des grands fonds. [...] Son message : cette nouvelle ressource, les minéraux des fonds marins, est la promesse d'un futur où l'on pourrait avoir des véhicules électriques dont les métaux ne seraient plus issus, par exemple, des mines de cobalt de la République démocratique du Congo où sont exploités femmes, enfants et personnes en situation précaire ; Barron est le champion d'un avenir très mécanisé aux impacts minimes sur l'environnement, voie résolue vers le développement durable.

[…] Mais Barron s'est très vite signalé par une attitude très hostile envers les ONG, qu'il dépeint comme antisciences, portées par une immense force de frappe face à laquelle The Metals Company n'est qu'un Petit Poucet. Barron a fait le choix du clivage, pour employer un mot à la mode, quand d'autres entreprises minières ont pris la voie du dialogue." ■

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL



LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

SHUTTERSTOCK

Portées au quotidien, les chaussures de sport sont devenues un phénomène de mode. Or leurs semelles et talons épais entraînent un impact du pied plus violent sur le sol, néfaste pour le tendon, le dos et jusqu'aux cervicales.

Mal de dos

La faute aux chaussures

De nombreuses études constatent l'impact négatif des chaussures modernes sur la santé, des dispositifs qui contrarient le fonctionnement naturel des pieds. Avec des conséquences douloureuses sur l'organisme, des chevilles à la nuque, en passant par le dos, affectant les muscles et tout l'équilibre du système musculo-squelettique. Explications.

Par Hervé Ratel

« *Mal de dos, mal du siècle* » a-t-on coutume de dire. Sont alors pointés du doigt la sédentarité, la station assise, le manque d'activités physiques, le surpoids… Mais on occulte un autre facteur possiblement plus influent : les chaussures, ces orthèses que nous portons en moyenne 10 heures par jour, tous les jours, des décennies durant, et ce depuis nos premiers pas. Quelle influence ont-elles sur notre squelette, notre musculature et notre santé ? Peut-on réduire les dommages éventuels qu'elles y occasionnent ? Depuis une quinzaine d'années, un mouvement a vu le jour, amorcé par des amateurs de courses de longues distances frustrés par trop de blessures récoltées au cours de leur activité, et amplifié par des études scientifiques. Leur *credo* ? Se déplacer pieds nus ou, à tout le moins, avec des chaussures dites minimalistes, qui laissent les plus libres possible les extrémités et leur imposent un minimum de contraintes. Car, si l'on n'imagine pas porter des gants de boxe en permanence, conscient que des protections aussi épaisses nuiraient à l'habileté de nos mains et à leur musculature, nos pieds ont droit à bien moins d'égards, habitués que nous sommes à les contraindre dans des dispositifs lourds et rigides.

VIVOBAREFOOT

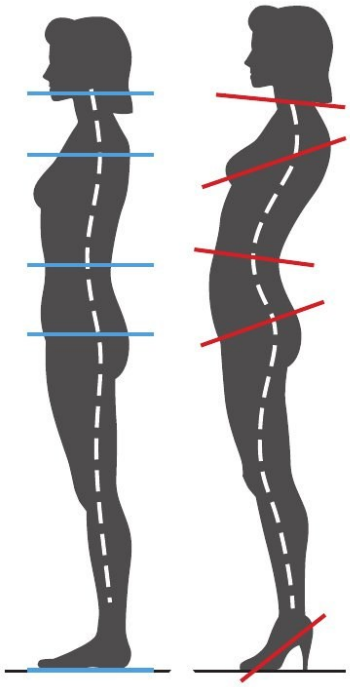
La chaussure minimaliste souple (à gauche), permet au pied de conserver sa conformation naturelle, contrairement à une sneaker moderne (à droite).

Pourtant, la main et le pied ne sont pas si différents. Ils comptent autant d'os (27 pour la première, 26 pour le second), ont un nombre de muscles comparables (34 pour la main, 29 pour le pied) et comportent tous deux une centaine de ligaments et de tendons. Les plantes de nos pieds contiennent autant de cellules nerveuses sensitives que les paumes des mains. Mais si la main est vénérée, le pied, lui, est le vilain petit canard de notre anatomie. Une injustice pour ce membre qui soutient tout notre poids, assure notre équilibre et est capable de prouesses d'adaptation. D'ailleurs, si l'être humain a commencé à acquérir son énorme cerveau, il le doit plus à ses pieds qu'à ses mains. Il y a plusieurs centaines de milliers d'années, les hominidés se nourrissaient de cueillette mais surtout de gibier, dont l'apport en protéines a fait exploser la capacité cérébrale. Or, dans ces balbutiements d'humanité, aucune arme de jet, arc ou fronde, n'avait encore été inventée pour permettre aux chasseurs d'abattre leurs proies à distance.

L'extraordinaire aptitude à l'endurance du pied humain

Munis seulement de cailloux et de bâtons, les premiers hominidés pourchassaient les animaux jusqu'à l'épuisement. Une endurance à la course de fond exceptionnelle, unique dans le monde animal, et rendue possible grâce à deux innovations : la capacité de suer de tout son corps et d'évacuer ainsi la chaleur tout en courant, alors que les autres animaux en sont incapables. Et, deuxième atout, la technicité de leurs pieds, capables d'évoluer sur pratiquement tous les terrains. « *Le pied humain est une structure extraordinaire optimisée sur des millions d'années,* décrit Antoine Perrier, docteur en biomécanique et podologue à l'APHP (Assistance publique-Hôpitaux de Paris). *Il est à la fois flexible et capable de se rigidifier passivement pour parcourir de longues distances.* »

Pour Daniel Lieberman, professeur de biologie de l'évolution humaine à l'université Harvard à Cambridge (États-Unis), ces aptitudes à la course d'endurance ont eu une incidence majeure pour notre espèce. Dans un numéro de *Nature* de 2004, le chercheur avait comparé les performances d'humains à celles de quadrupèdes et en avait conclu que si nous ne sommes pas très performants en sprint comparativement aux chevaux ou aux antilopes, nous sommes champions pour courir sur de longues distances. Et nos pieds en sont les principaux architectes. Depuis ces travaux *(lire l'encadré p. 68)*, le chercheur a d'ailleurs mis en application ses conclusions : il n'est pas rare de croiser le sexagénaire en train de faire son footing pieds nus dans les rues de Cambridge. C'est d'ailleurs tout aussi légèrement chaussé qu'il a couru plusieurs fois les marathons de Boston et de New York.



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : BAREFOOT STRENGTH

Plus les talons sont hauts, plus la colonne vertébrale et le cou subissent des contraintes de torsion.

Les dommages sur le corps visibles plus tôt chez les coureurs

Depuis ces temps immémoriaux, le pied n'a que très peu évolué. Mais il n'en va pas de même des dispositifs dont nous le parons. Pour quelques activités professionnelles, un chaussant spécifique est nécessaire, comme une coque renforcée sur le devant des chaussures de chantier ou le talon des bottes d'équitation. En dehors de cela, depuis l'Égypte ancienne, le chaussant est moins considéré comme un moyen de protéger le pied que comme un artifice pour afficher sa supériorité et son rang social *(lire l'encadré p. 70)*. Il est longtemps resté réservé à une élite. Tout change radicalement à partir des années 1970 et l'arrivée des sneakers « modernes » : l'intégralité de la population, riche comme pauvre, se chaussera désormais avec des dispositifs contrariant le fonctionnement naturel du corps. Bien sûr, avec plusieurs dizaines de millions d'années d'évolution derrière lui, ce corps est suffisamment performant et endurant pour encaisser les changements induits par le port de ces prothèses qui vont à l'encontre de sa mécanique, au moins durant un temps. Il faut plusieurs années avant que les bouleversements provoqués par les chaussures remontent le long des cuisses, parcourent le dos et parviennent jusqu'au cou. Cependant, chez les adeptes de la course d'endurance et du jogging, il est possible de

DÉCRYPTAGE

Les 4 faiblesses des chaussures

Talon
Invention relativement récente comparée à nos 2 millions d'années de marche debout, le talon, lorsqu'il fait ressortir le fessier, entraîne de lourdes conséquences sur les chevilles, les genoux, le bassin et les lombaires.

Rigidité
En contraignant les mouvements du pied, la chaussure produit des effets sur l'équilibre et la stabilité générale. Et cela devient de plus en plus problématique à mesure qu'on avance en âge.

Pointe
Étriqué, l'avant ne respecte pas l'anatomie d'orteils censés être plus écartés parce que naturellement essentiels pour la pose du pied. Ce rôle étant tenu par le talon dans les chaussures actuelles, les orteils auront tendance à perdre en muscles.

Semelle
En plus de rigidifier les chaussures, ce sont plusieurs centaines de milliers de capteurs proprioceptifs sous nos pieds qui sont réduits au silence par des semelles épaisses.

GETTY IMAGES

déceler plus tôt les dommages provoqués par les chaussures. Ce sont eux qui vont fournir aux scientifiques les données les plus immédiates. Depuis une quinzaine d'années, quantité d'études concernant l'impact négatif sur la santé des chaussures modernes sont ainsi publiées. On a tendance à l'oublier, mais tout ce qui contraint nos pieds a des conséquences à plus ou moins long terme sur l'ensemble de notre corps, des chevilles à la nuque, en passant par le dos, affectant tout l'équilibre de notre système musculo-squelettique.

À partir des années 1970-1980, les marques vont donc faire croire au consommateur qu'il a besoin d'amortis et d'innovations de toutes sortes dans ses chaussures : semelles absorbantes, supports de voûte plantaire, stabilisateurs, etc., alors qu'aucun ne s'est avéré efficace sur la santé. Comme le décrit Blaise Dubois, physiothérapeute et créateur de La Clinique du coureur, un organisme de formation continue pour la prévention des blessures en course à pied : *« La chaussure de sport n'a pas l'obligation d'être homologuée ni examinée par une société savante ou un organisme indépendant. C'est un produit de mode, on fait ce que l'on veut. Cela va à l'encontre de la méthode scientifique de validation, un processus obligatoire complexe et rigoureux pour toute molécule pharmacologique et appareillage médical mis sur le marché. »*

En 2008, une méta-analyse réalisée par Craig Richards, expert à l'université de Newcastle (Royaume-Uni) le démontrait sans ambiguïté dans le *British Journal of Sports Medicine* : il n'existe aucune étude clinique évaluant leur efficacité en tant que dispositif de prévention des blessures. D'ailleurs, l'introduction de chaussures toujours plus « performantes » sur le marché n'a pas changé la proportion de blessures chez les joggers et coureurs amateurs. D'année en année, ce sont jusqu'à 80 % d'entre eux qui déclarent s'être blessés, le plus souvent au genou. Plus édifiant encore, selon un travail dirigé par Bernard Marti, spécialiste de médecine préventive à l'université de Berne (Suisse), plus un modèle de sneakers est onéreux, plus il fait courir un risque. Les coureurs qui portent les modèles les plus chers sont à 123 % plus sujets aux blessures que ceux utilisant des modèles bon marché. Plus la chaussure a d'amortis, moins elle protège ! En 2018, une équipe de chercheurs finlandais confirmait cette conclusion surprenante : lorsqu'on court dans des sneakers haut de gamme, les impacts au sol s'avèrent environ 11 % plus violents. Un résultat contre-intuitif que l'on retrouve par exemple chez les gymnastes : plus le matelas de réception est

LA CLINIQUE DU COUREUR

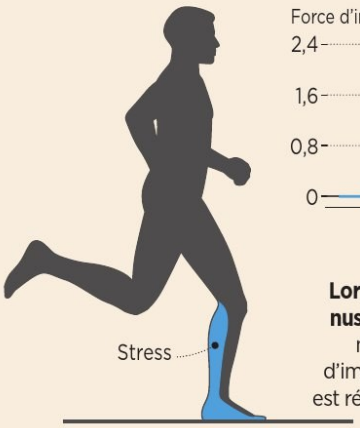
« La chaussure de sport n'a pas l'obligation d'être homologuée ni examinée par une société savante »

Blaise Dubois, physiothérapeute et créateur de La Clinique du coureur

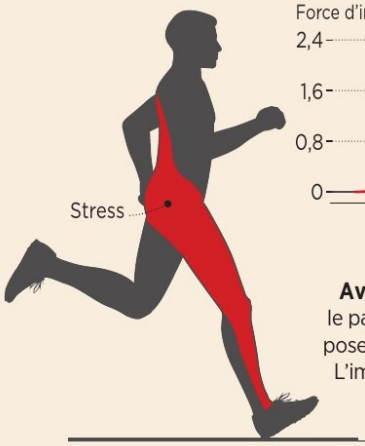
MODÉLISATION

Le poids des pieds, le choc des talons

Lorsque, dans les années 1970, les préparateurs sportifs ont introduit un talon dans des sneakers jusque-là plates, c'était pour les compétitions de sprint. Ils s'étaient aperçus que si les coureurs atterrissaient sur les talons, cela leur permettait de faire des foulées un peu plus grandes et de gagner quelques centièmes de seconde aux 100 m et 200 m. Mais très vite, les marques ont promu pour toute la population ces chaussures, d'abord conçues pour un usage bien spécifique et nullement destinées à être portées en permanence. Les sneakers ont alors totalement modifié la manière de nous déplacer. En effet, nos pieds sont conçus de telle sorte que nous attaquions le sol sur l'avant-pied ou à mi-pied, avec les orteils pour amortir nos pas durant la marche ou la course. Or, les sneakers, avec leurs semelles et leurs talons épais et rigides, comme toutes les autres chaussures modernes, ont conduit leurs utilisateurs à modifier inconsciemment leur démarche pour attaquer chaque pas avec le talon. Preuve en est qu'aujourd'hui 95 % des coureurs amateurs le font. Les conséquences ont été modélisées par Daniel Lieberman de l'université de Cambrige (États-Unis) et son équipe en 2010 dans *Nature*. Lorsque l'on court, chaque pas soumet l'organisme à des forces causées par l'impact du pied sur le sol. Or, ont démontré les chercheurs, l'attaque par le talon génère à chaque pas une force d'impact supplémentaire. Fulgurante, elle équivaut à plusieurs fois le poids de l'individu. Et même si l'impact est moindre, le phénomène reste le même lors de la marche.



Lors de la course pieds nus, la réception tend à minimiser la force d'impact. L'attaque talon est réduite, le pas est court.



Avec des chaussures, le pas est plus ample et la pose du talon plus brutale. L'impact sur le corps est plus étendu.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : LA CLINIQUE DU COUREUR

épais, plus la réception est brutale. Instinctivement, les athlètes recherchent la stabilité. Lorsqu'ils sentent une surface molle sous leurs pieds, ils atterrissent plus rudement pour conserver leur équilibre.

95 % des pieds plats sont dus à la conformation du chaussant

De la même façon, des pieds engoncés dans des chaussures moelleuses cherchent à « traverser » la semelle pour sentir une surface stable, augmentant d'autant les impacts à chaque pas. Impacts qui auront des conséquences sur toute la chaîne musculo-squelettique au bout des millions de pas que nous accomplissons en moyenne tous les ans. Et ce n'est pas tout. Sont également à déplorer toutes les malformations nées de la conformation anti-anatomique de nos chaussures. En début de chaîne, elles sont très connues. À l'instar des hallux valgus (plus vulgairement nommés « oignons »), cette déviation du gros orteil qui affecte 55 % des femmes — soit neuf fois plus que les hommes. Ou les pieds plats, touchant 40 % de la population, mais dont 5 % seulement sont d'origine génétique. En effet, 95 % des pieds plats sont acquis. En cause, disent les spécialistes, ce dispositif de soutien de voûte plantaire qui équipe les chaussures actuelles. Lequel affaisse petit à petit la voûte naturelle… Cela peut sembler paradoxal, mais le soutien de voûte de la chaussure, en prenant le rôle de la structure naturelle du pied, conduit à rendre celle-ci inutile parce que plus du tout sollicitée. Résultat : les muscles fondent. Les tendons s'affaissent. Le pied se fait plat. « *Le soutien de voûte plantaire est l'une des pires catastrophes des chaussures modernes,* déclare Yvan Raggi, podologue à Nantes. *Il contribue à annihiler totalement notre ressort mécanique naturel.* » Et Antoine Perrier de préciser : « *Car, si nous naissons tous avec des pieds plats, vers 4 ans les capitons graisseux disparaissent naturellement pour laisser apparaître les voûtes plantaires. Heureusement,*

ANYASREVIEWS.COM

Légères et très souples, les chaussures minimalistes offrent une sensation proche de la marche pieds nus.

chausser les tout-petits avec des chaussures munies de soutien de voûte n'est plus autant préconisé qu'avant. En France, cela semble en train de changer. »

Mais, globalement, tous les pieds contenus dans des chaussures conventionnelles souffrent de perte musculaire progressive. L'une des conséquences les plus directes est qu' *« on a froid aux pieds,* indique Kristiaan D'Août, de l'université de Liverpool (Royaume-Uni). *Et comme la circulation sanguine chez les femmes est moindre et que leurs chaussures sont en moyenne plus contraignantes que celles des hommes, elles expérimentent très souvent cette sensation.* » Sans compter que plus on vieillit, plus ces problèmes de fonte musculaire, nerveuse et circulatoire s'aggravent. Viennent s'y ajouter des pertes d'équilibre et de proprioception au fur et à mesure que l'individu entre dans le grand âge. Kristiaan D'Août et ses collaborateurs ont montré en 2020 à quel point la stabilité et la mobilité de personnes âgées ayant un historique de chutes fréquentes étaient améliorées quand ils marchaient pieds nus ou en chaussures minimalistes.

REUTERS/JOSE LUIS GONZALEZ

ETHNIE

Les Tarahumaras, des coureurs hors pair

Réfugiée dans les replis escarpés de la Sierra Madre occidentale lors de l'invasion des colons espagnols au XVIe siècle, cette ethnie compte entre 55 000 et 85 000 personnes, l'une des plus importantes au nord du Mexique. Pour relier les établissements de foyers parfois très lointains, les Tarahumaras courent à tout âge sur les sentiers étroits. Ils en ont même fait une tradition. Après avoir festoyé toute la nuit en s'abreuvant d'une tequila maison à base de serpent et de cactus, ils s'élancent au matin pour des courses de deux jours. Comme l'écrit Christopher Mc Dougall dans son livre *Born to run*, les coureurs tarahumaras ont fait l'équivalent de 12 marathons — 500 km — en une journée et une nuit. Certains champions auraient même fait 700 km d'une seule traite ! À leurs pieds, des sandalettes attachées par un lien de cuir.

Un peu plus haut vers la cheville, penchons-nous maintenant sur le tendon d'Achille. Plus on porte des talons hauts, plus les tendons s'atrophient et raccourcissent. Ce qui explique que celles qui en portent trop souvent éprouvent des difficultés à s'en passer. Mais les porteurs de sneakers ne sont pas épargnés. En 2014, une étude australienne montrait que le simple fait de marcher avec ces chaussures à talons modérés suffisait à augmenter la tension au niveau du tendon, un facteur pouvant conduire à une tendinopathie. *Idem* pour le genou qui, dans des chaussures classiques, est sujet à l'ostéoarthrite — maladie articulaire affectant plus de 10 millions de Français. En bout de chaîne, enfin, le dos et le cou : une étude réalisée par l'université de Zurich (Suisse) en 2011 sur une trentaine de sujets montrait que marcher dans des chaussures modifiait l'activité musculaire et nerveuse dans ces zones, par rapport à la même action pieds nus. Et les chercheurs de préconiser des études sur le long terme pour des patients souffrant du dos et du cou. Dans l'*International Journal of Advanced research* en 2015, le *Journal of Novel Physiotherapies* en 2017 ou encore dans l'*International Journal of Pathology* de 2018, des équipes ont ainsi montré que plus les talons étaient hauts et portés souvent, plus ils occasionnaient des douleurs au dos.

Toutes les chaussures modernes ont les mêmes défauts

Car il faut bien reconnaître que, de manière très schématique, toutes les chaussures modernes se ressemblent. Qu'il s'agisse de sneakers, de bottines, de mocassins, de rangers ou d'escarpins, toutes, à des degrés divers, ont en commun quatre caractéristiques : elles sont raides, l'avant est étroit, la semelle est rigide et pourvue d'un talon. Et les tongs ? pourrait-on objecter. C'est pire : bien qu'elles soient larges, ouvertes et flexibles, elles nous forcent à crisper les orteils pour ne pas les perdre, tout

comme les mules, les sabots ou les claquettes. Non contentes de modifier la démarche naturelle, elles peuvent donc sur le long terme conduire à la pathologie des « orteils en marteau ». De plus, elles obligent à frapper le sol avec le talon *(lire l'encadré p. 68)* pour pouvoir les conserver aux pieds, entraînant les mêmes problèmes musculo-squelettiques que les chaussures fermées classiques. Si l'on en croit donc la myriade d'études scientifiques sur la question, il faudrait s'affranchir des contraintes mécaniques et structurelles des chaussures conventionnelles qui handicapent et affaiblissent les pieds, limitent les mouvements et les sensations, avec des conséquences à plus ou moins long terme sur les genoux et le dos. *« Si l'on pouvait tous marcher pieds nus,* avance Yvan Raggi, *je vous garantis que bien des cabinets d'ostéopathie seraient contraints de mettre la clé sous la porte ! »*

L'autre solution serait de porter des chaussures dites minimalistes (*barefoot* en anglais) dont l'architecture vise à respecter la mécanique et la conformation du pied. Elles sont très souples, l'avant est large pour ne pas comprimer les orteils, la semelle est fine et n'est pas surélevée à l'arrière. Depuis dix ans, on trouve de plus en plus de petites marques de chaussures spécialisées dans ce type d'équipement, avec une trentaine de boutiques en ligne. Mais on peut dénombrer trois écueils sur la route de l'acceptation de ce nouveau type de chaussant. En premier lieu, les chaussures traditionnelles sont érigées

HISTOIRE

Être chaussé, un signe extérieur de richesse très coûteux

Depuis au moins l'Égypte ancienne, le chaussant est un marqueur de classe. Les sandales surélevées des hauts dignitaires de l'empire devaient se voir comme un signe extérieur de richesse et de noblesse, en plus de permettre de dominer physiquement leurs sujets. Lorsque le talon acquiert une véritable utilité — conférer une meilleure assise dans les étriers aux cavaliers perses du Moyen Âge —, il demeure un emblème de noblesse. Plus tard, dans l'Europe du XVIIe siècle, rien ne change puisque, là encore, les talons hauts, alors uniquement portés par les hommes fortunés, symbolisaient leur rang élevé. Ces orthèses les handicapaient à tel point qu'ils devaient faire appel à des tiers pour se déplacer, faire leurs courses, etc. Et c'était bien là le but recherché : plus les talons étaient hauts, plus celui qui les portait devait être assez riche pour payer des gens pouvant subvenir à ses besoins. Du moins, c'est le signal envoyé à ceux qu'il croisait. Mais l'hubris humaine ne se situe pas uniquement dans les talons. Au XIVe siècle, la mode était aux poulaines, de longs souliers étroits et pointus pouvant mesurer jusqu'à 50 cm. Plus elles étaient longues, plus elles handicapaient leur porteur et plus ce dernier signalait l'ampleur de sa fortune. En 2021 ont été exhumés, dans quatre anciens cimetières médiévaux de Cambridge et ses alentours, 177 squelettes datant de la fin du XIVe siècle. Les archéologues ont pu constater des difformités effroyables au niveau des orteils. Ceux dont les oignons (hallux valgus) étaient les plus prononcés étaient enterrés au centre de la ville, dans les quartiers les plus riches ou appartenant au clergé. De 3 % de squelettes ayant souffert de cette affliction dans le cimetière rural, le chiffre grimpait à 43 % dans ces zones aisées.

AKG IMAGES

Au XVIIe siècle, les talons hauts sont très prisés chez les hommes, en particulier à la cour de Louis XIV (au centre). Le souverain les affectionnait rouges et d'une hauteur de 10 à 12 cm.

en dogme depuis un demi-siècle car portées par une écrasante majorité de la population grâce à un marketing surpuissant. Et leurs dommages mettent parfois des années avant de se déclarer, sans que le lien soit automatiquement tracé entre les deux. Ensuite, on peut avoir le sentiment de connaître la marche pieds nus si l'on se déchausse tous les soirs chez soi ou trois semaines par an pendant les vacances. Mais de l'avis de nombre d'utilisateurs, c'est une expérience très différente de marcher en permanence débarrassé des chaussures traditionnelles et de sentir ses pieds, ses chevilles, ses genoux et son dos gagner jour après jour en robustesse. Enfin, dernier écueil, depuis des siècles, les pieds sont déconsidérés voire moqués — *« bête comme ses pieds ! »* —, les chaussants étant conçus et considérés pour des questions de mode ou de statut social mais jamais de santé. Il serait peut-être temps de les regarder autrement, eux aussi. Précisons toutefois que marcher « comme pieds nus » n'est pas forcément indiqué pour tous. Les spécialistes déconseillent la pratique à certaines personnes, comme *« les diabétiques,* précise Kristiaan D'Août. *Ils sont atteints d'une neuropathie qui s'accompagne d'une perte de proprioception des pieds. Il leur faut des semelles très dures. »*

Pieds nus, les performances biomécaniques sont meilleures

En revanche, si l'on veut changer ses habitudes, mieux vaut commencer le plus tôt possible. En 2021, une étude japonaise a consisté à suivre durant quatre ans une centaine d'enfants d'une dizaine d'années pourvus de chaussures minimalistes. Une autre centaine d'enfants de la même ville, chaussés classiquement, faisait office de groupe contrôle. Armés de caméras ultrarapides, les scientifiques ont capturé les courses des élèves pour les analyser : sur le long terme, concluent-ils, le groupe d'étude s'avère avoir de bien meilleures performances biomécaniques que le groupe de contrôle.

GILLES BERILLON

VERBATIM

GILLES BERILLON

PALÉOANTHROPOLOGUE AU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE À PARIS, SPÉCIALISTE DE LA BIPÉDIE

« Le déplacement naturel a toujours été pieds nus »

“Nous savons assez peu de chose sur la façon dont se chaussait la population générale dans le passé. La première trace de chaussant exhumé remonte à 6000 ans. Le plus souvent, ce sont des chaussants « récents » et qui donnent une vue biaisée du sujet. Par exemple, les chaussures appartenant à la noblesse sont connues car représentées (peintures, sculpture) ou conservées dans les châteaux. On sait aussi que, dans les milieux ruraux notamment, le sabot de bois a eu son importance jusqu'à récemment dans l'histoire. Néanmoins, nous nous sommes construits pendant des millions d'années sans chaussants. Les premières preuves indirectes de ces derniers remontent à une période comprise entre 50 000 et 25 000 ans avant le présent, et ils ont pu être en peaux ou en végétaux. Ils sont vus non pour aider à la marche mais pour protéger le pied. Dès que l'on commence à mettre quelque chose à nos pieds, cela a un impact, petit ou grand. Tout dépend de la taille du chaussant, de la fréquence avec laquelle on le met, de son usage, etc. Et c'est logique, ne serait-ce que parce que nos tissus se renouvellent en permanence. Si vous vous habituez à porter des talons, par exemple, les contraintes naturelles sont modifiées et le renouvellement osseux va se faire selon ces nouvelles contraintes, d'où de possibles déformations. Le déplacement naturel a toujours été pieds nus ; ce pied est d'une efficacité redoutable et il est important qu'il reste le plus actif possible. Par exemple, les stimulations de la plante mettent en jeu un système de contrôle moteur ultrafin et rapide qui lui permet de s'adapter aux particularités du sol.”

POUR EN SAVOIR PLUS

Livres

- **Born to Run. Né pour courir,** Christopher Mc Dougall, Guérin édition, 416 p., 29 €
- **La Clinique du coureur,** Blaise Dubois et Frédéric Berg, Mons éditions, 496 p., 35,90 €
- **Va Nu-Pieds !,** Katy Bowman, Éditions Ressources primordiales, 168 p., 14,90 €

Internet

- Où trouver des chaussures minimalistes (ou *barefoot* en anglais) ? **sciav.fr/920barefoot**
  sciav.fr/920chaus

Si vous franchissez le pas et décidez d'essayer la locomotion en chaussures minimalistes — parce que l'alternative de marcher pieds nus en ville peut être souvent mal vue, parfois dangereuse et toujours salissante… —, prudence toutefois. Vos pieds, vos chevilles, vos genoux, affaiblis par des années de port de chaussures conventionnelles, ont perdu en tonus musculaire et en flexibilité. Il sera peut-être nécessaire de les renforcer par des exercices et des marches sur différents terrains. Tout spécialement si vous êtes un adepte du jogging. Avant de courir, il faut donc (ré)apprendre à marcher. ■

Le cheval, un allié thérapeutique face à l'AVC

La rééducation après un accident vasculaire cérébral pourrait bénéficier d'un dispositif très original. Près des gorges du Tarn, un étonnant institut d'hippothérapie propose une réadaptation fonctionnelle par le mouvement du cheval. Un essai clinique est en cours pour valider cette technique innovante.

Silence, lumière, espace. Le lieu donne l'impression d'être au bout du monde. Nous sommes aux confins boisés de la Lozère et de l'Aveyron, sur le causse de Sauveterre, pas très loin des gorges du Tarn, à près de 1000 m d'altitude. Un endroit unique où les « soignants » dorment à la belle étoile, mangent du foin tout spécialement venu du proche Aubrac et sont soigneusement brossés à l'aurore. Car ici, les « thérapeutes » (une dizaine) se prénomment Navajo, Ursula, Dalton… et sont tous… des chevaux. Nous sommes à Equiphoria (1), un centre entièrement pensé comme un lieu de soin et de réadaptation fonctionnelle médié par le cheval. L'institut a été créé en 2012 par Hélène Viruega-Bogros, titulaire d'un diplôme américain d'ESMHL (Equine Specialist in Mental Health and Learning, spécialiste équin en santé mentale et en apprentissage) et cavalière émérite — de la trempe de celles et ceux qui murmurent aux oreilles des chevaux —, et son époux Erik Bogros. Il accueille chaque année environ 250 patients par le bouche-à-oreille, sur les conseils de médecins et autres professionnels de santé.

MANUEL GAVIRIA

« Le pas cadencé du cheval permet d'enclencher un processus d'activation des circuits neuronaux du patient »

Manuel Gaviria, médecin rééducateur, coauteur du protocole et membre de l'équipe d'Equiphoria

Il s'agit d'un institut d'hippothérapie, une réadaptation fonctionnelle et globale par le mouvement du cheval. Les séances se déroulent dans le manège, au pas, et sont conduites par trois professionnels qui entourent le cheval et le patient, lequel n'a pas d'action de direction sur l'équidé. *« Ce que l'on va chercher avec l'hippothérapie,* explique Hélène Viruega-Bogros, *c'est la transmission au patient du pas du cheval, le plus proche de la marche humaine. »* Pour introduire en France cette approche, elle s'est inspirée de son expérience américaine, quand elle vivait dans les plaines du Montana et découvrit des centres (il en existe plus de 800 aux États-Unis) proposant des programmes adaptés face à différentes pathologies (neurologiques, psychiatriques, autres types de handicaps…). Tous sont homologués par l'association PATH Intl (Professional Association of Therapeutic Horsemanship International), créée à la fin des années 1960.

EQUIPHORIA

La rééducation par hippothérapie permet d'agir à la fois sur les fonctions motrices, sensorielles et cognitives (ici, une patiente atteinte d'un AVC au centre Equiphoria).

De retour en France, Hélène Viruega-Bogros et son mari trouvent ce magnifique terrain d'environ 40 hectares avec un manège équestre à l'abandon. Coup de cœur immédiat pour ce lieu depuis entièrement réhabilité avec ses écuries, son paddock, ses salles de thérapie, où se déroule aujourd'hui une première en France : un essai clinique dans la prise en charge de l'accident vasculaire cérébral (AVC). Son objectif : démontrer la supériorité de l'hippothérapie sur la réadaptation neurologique conventionnelle basée sur un suivi multidisciplinaire (kinésithérapie, orthophonie, ergothérapie, neuropsychologie). Mené en collaboration avec le centre hospitalier sud-francilien (CHSF) Corbeil-Essonnes, l'essai est financé par le laboratoire Boehringer Ingelheim et validé par l'Agence nationale de sécurité sanitaire (ANSM) et par un comité d'éthique. Démarré il y a un an, il est toujours en cours de recrutement (2) : 52 patients de moins de 80 ans ayant subi un AVC (datant de moins d'un an) seront tirés au sort et répartis en deux groupes, la moitié seulement bénéficiant de séances d'hippothérapie (quatre semaines) réparties sur 22 semaines. Ensuite, la récupération fonctionnelle, calculée selon des scores établis à partir de grilles d'évaluation, sera comparée entre les deux groupes.

Par quels mécanismes la plus belle conquête de l'humain pourrait-elle donc aider les patients cérébrolésés dans leur rééducation ? « *Le pas cadencé du cheval permet d'enclencher un processus d'activation des circuits neuronaux du patient par l'intermédiaire des mécanismes de plasticité cérébrale,* explique le Dr Manuel Gaviria, médecin rééducateur, coauteur du protocole et membre de l'équipe d'Equiphoria. *Le but est d'agir à la fois sur les fonctions motrices (symétrie, équilibre postural, alignement…) mais aussi sensitives, sensorielles, cognitives (attention, concentration) et psychiques, la globalité de la prise en charge étant ici essentielle.* » « *Une heure passée sur un cheval se traduit par des micromouvements posturaux et environ 5000 sollicitations cérébrales différentes,* poursuit le Pr Didier Smadja, chef du service neurologie du CHSF. *L'idée n'est pas ici d'obtenir de nouveaux neurones mais d'optimiser les fonctions de ceux qui restent en les stimulant. Nous souhaitons parvenir à démontrer que la marche sans appui peut être récupérée.* » Et le neurologue de poursuivre : « *Il y a aujourd'hui un vrai déficit d'intérêt dans la rééducation de l'AVC. Si la prise en charge en urgence incontestablement s'améliore et passionne les neurologues, la rééducation est quant à elle nettement moins bien considérée et nous avons dans ce domaine besoin d'innovations.* »

Un recrutement minutieux des « collaborateurs » équins

À Equiphoria, une dizaine de personnes (médecins, kinésithérapeute, psychologue, spécialistes équins, palefreniers…) s'occupent des patients et des chevaux, « *nos collaborateurs à temps plein* », précise Romain, le psychologue. Pour les équidés, il existe des aires de repos et de détente bien distinctes de celle du travail — le manège. Ils ont même régulièrement droit à leur

DISPOSITIF

Un simulateur pour choisir le bon cheval

C'est un cheval mécanique insolite constitué d'une encolure et d'un dos mais sans jambes, dit TESS (Therapeutic Equine Simulator System). Lors de sa conception, réalisée en tandem étroit par Equiphoria et le constructeur britannique Racewood Simulator, des capteurs ont été disposés sur les articulations des jambes et sur le dos de cinq chevaux, eux bien réels, afin d'enregistrer les spécificités de leurs pas. Puis, des logiciels ont enregistré ces cinq différents pas, un ensemble de mouvements latéraux, verticaux et de bascule. Le dispositif peut ensuite les reproduire et s'animer, mimant au choix le pas de l'un des cinq équidés. Une fois le patient installé sur TESS, des capteurs disposés sous la selle permettent, en fonction de son positionnement, de repérer la projection de son centre de gravité par un point rouge visible sur un écran. Selon les réactions du cavalier aux type et rythme du pas, l'équipe peut affiner son choix du cheval le plus adapté au patient, selon la rééducation prévue et avant de la séance de monte qui se déroulera dans le manège.

EQUIPHORIA

Ce cheval mécanique muni de capteurs mime plusieurs types de pas dont l'un conviendra mieux au patient.

propre ostéopathe équin. Le lieu est soigné, lumineux, conforme aux normes d'accessibilité aux personnes en situation de handicap, entièrement conçu pour délivrer des soins de réadaptation fonctionnelle et neurologique. L'ambiance est à la concentration et au travail. Résultat : une atmosphère calme, apaisante et ritualisée. « *Mettre un patient hémiplégique ou fragilisé par un traumatisme ancien sur un cheval, c'est assez inhabituel,* admet Hélène Viruega-Bogros. *Il faut donc tout anticiper et être particulièrement rigoureux. Tout en se concentrant non pas sur les limites du patient et ce qu'il ne peut plus faire mais, à l'inverse, sur ce qui est possible.* »

Très en amont, il y a le travail de l'hippothérapeute, le choix des chevaux pour leurs qualités biomécaniques, les caractéristiques de leur pas, leur tempérament qui demandent des heures de préparation. Puis, quand les patients sont là, le programme se déroule à raison d'une heure par jour, cinq jours d'affilée. Il débute par un test de marche d'une minute : la traversée à pied, avec ou sans béquilles selon les possibilités de chacun, du couloir du bâtiment principal. Un moment filmé et archivé pour évaluer dans le temps l'évolution et les progrès. Puis, avant de se mettre en selle, il est un passage obligé pour le patient : le simulateur, un cheval mécanique, outil de mesure et de mise en condition *(lire l'encadré ci-contre)*.

Reconstruction du schéma corporel et de l'image de soi

Ensuite, direction le manège, où les accompagnants, pour ne pas interférer avec la séance, peuvent s'installer dans un espace vitré situé au-dessus du manège. C'est au tour de Dalton, Ursula ou Navajo de se mettre au travail. Puis suivra dans la journée le temps du débriefing. Chaque professionnel s'y exprime, rapporte ce qu'il a vu, ressenti : un patient plus ou moins tendu ou à l'inverse à l'aise par rapport aux séances précédentes, un aidant stressé qu'il faudra soutenir. Sans oublier la gestion des émotions qui se manifestent sans prévenir pendant les séances, les patients étant souvent très bouleversés par le potentiel qu'ils découvrent en eux. Lors des tours de manège, les visages s'éclairent, les corps se détendent. Reconstructions du schéma corporel, de l'image et de l'estime de soi sont ici à l'œuvre alors que la dépendance et la fragilité s'estompent, laissant place à la fierté et au plaisir d'être là, porté mais actif et vivant. « *Et puis le mouvement, c'est bien ce qui crée l'envie d'avancer et d'aller plus loin non ?* », rappelle Hélène Viruega-Bogros avant d'aller flatter l'encolure de ceux qui ont, une fois encore, bien travaillé. ■ **Sylvie Riou-Milliot**

(1) www.equiphoria.com
(2) Le CHSF est en recherche de patients. Contact : edwige.lescieux@chsf.fr

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

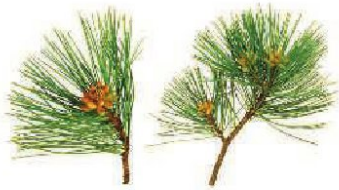
Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

Indispensable irrigation

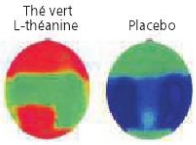


Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



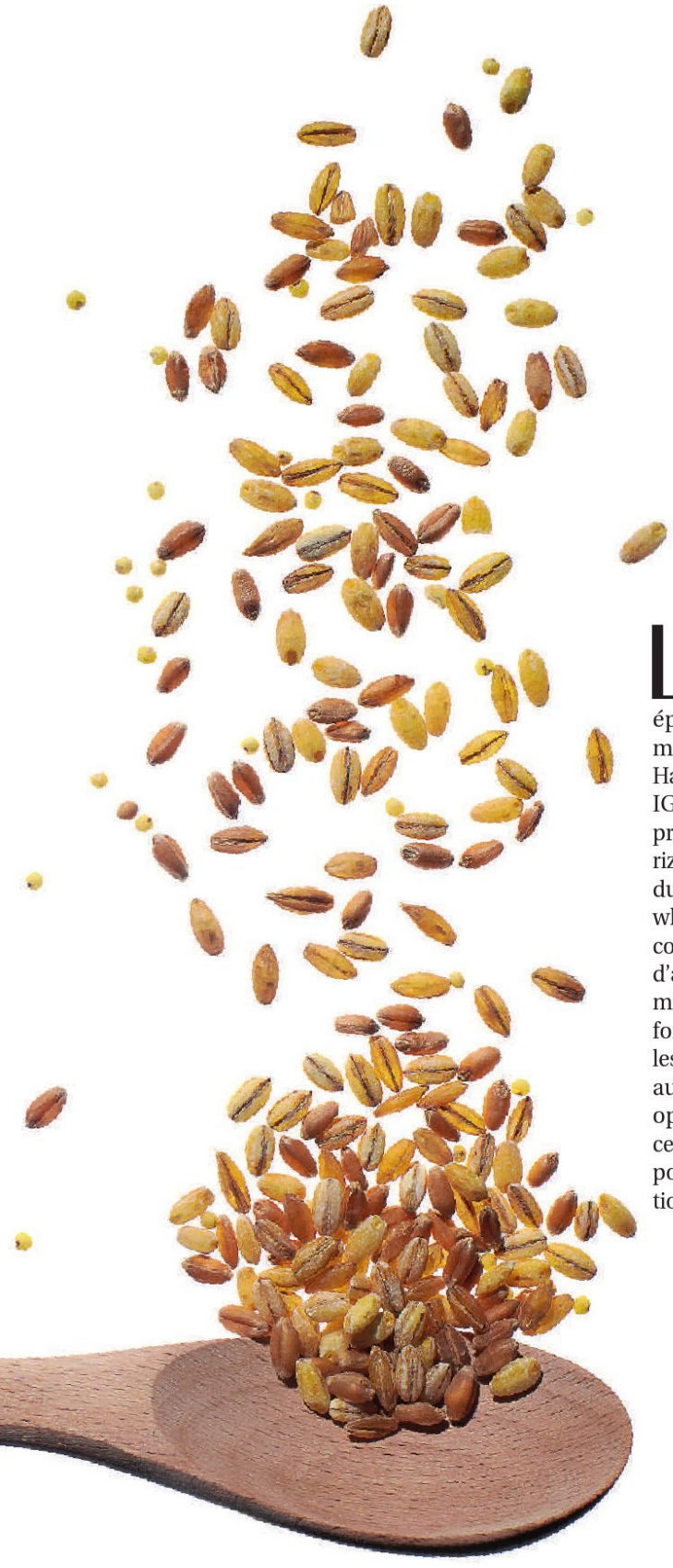
L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 85 81 21 60** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 cp est disponible grâce au code **ACL 295 18 63**



Le retour des céréales d'antan

Millet, sorgho, kamut..., ces céréales négligées par l'agriculture intensive séduisent par leur apport en nutriments et en antioxydants et leur rôle bénéfique sur le microbiote.

Les grains rustiques, longtemps oubliés, reviennent au goût du jour. Le petit épeautre (ou engrain), patrimoine alimentaire culturel de Haute-Provence et porteur d'une IGP (indication géographique protégée), se cuisine comme du riz. L'orge, plus connue pour produire du malt pour la bière et le whisky, agrémente les salades composées. Des céréales venues d'ailleurs comme le sorgho (gros mil) ou le blé khorasan (kamut) font aussi leur apparition dans les rayons. Ayant subi peu, voire aucune sélection variétale par opposition au maïs ou au blé, ces céréales anciennes séduisent pour leurs hautes valeurs nutritionnelles et peuvent compléter le panel de céréales complètes que le Programme national nutrition santé (PNNS) encourage à consommer au moins une fois par jour.

8 millions de tonnes

d'orge sont récoltées en moyenne par an en France, premier producteur européen, devant l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark.

(SOURCE: CHAMBRE D'AGRICULTURE.)

Les grains entiers apportent davantage de nutriments

Les céréales anciennes sont une source de minéraux et de vitamines du groupe B : 100 g de millet apportent 44 mg de magnésium aux vertus antistress ; 100 g de flocons d'avoine (les grains sont débarrassés de leur enveloppe et précuits à la vapeur), 422 mg de phosphore, 4 mg de fer ou encore 39,6 microgrammes de vitamine B9, jouant un rôle essentiel dans la production du matériel génétique (ADN, ARN) et des acides aminés (1). Mais c'est dans leur endosperme (enveloppe) que se logent le plus de nutriments. Consommer de l'orge mondé (grain entier) apporte 264 mg/100 g de phosphore (contre 221 mg avec l'orge perlé, dépourvu de son enveloppe) et 452 mg/100 g de potassium (contre 280 mg avec l'orge

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

FLAVONOÏDES Pigments végétaux jaunes, rouges, bleus ou violets, de la famille des polyphénols. On compte les flavonones, flavonols, flavones, isoflavones, anthocyanes, etc.

AMIDON Glucide complexe composé de deux homopolymères, l'amylose et l'amylopectine. Il s'agit d'une molécule de réserve pour les végétaux supérieurs.

BÊTA-GLUCANES Polysaccarides constitués de D-glucose, présents dans le son des céréales telles que l'orge, l'avoine et le seigle.

perlé) (2). Pour éviter les résidus de pesticides, mieux vaut les acheter bio.

C'est une bonne source d'antioxydants

100 g de poids sec de millet perlé et de sorgho fournissent respectivement 51,4 mg et 43,1 mg d'acides phénoliques (3) (acides caféique, férulique, gallique, vanillique, lutéoline et apigénine) aux propriétés anti-inflammatoires, antidiabétiques et anti-athérogènes (qui ne favorisent pas la formation de plaques d'athérome) (4).

Les céréales anciennes apportent également des flavonoïdes, qui auraient des propriétés anti-inflammatoires et protectrices du système digestif. Selon des travaux italiens, la consommation de kamut entraînerait une diminution significative du taux de cytokines pro-inflammatoires : –34,6 % de TNF alpha, –23,6 % d'interleukine 6 (IL6) et –28,1 % d'interleukine 12 (IL12) (5).

Leurs fibres réduiraient les facteurs de risques cardio-vasculaires...

Les céréales anciennes sont riches en glucides, principalement de l'amidon (63,4 à 72,5 % pour le sorgho, 54 à 75 % pour l'orge) qui, lentement digéré, réduirait le taux de sucre dans le sang (6). Le millet cuit apporte 1,3 g/100 g de fibres, le son d'avoine 16,7 g/100 g, principalement des bêta-glucanes, dont la consommation quotidienne (3 g de bêta-glucanes d'avoine dans l'étude) entraînerait une diminution des LDL (lipoprotéines de basse densité) de 0,25 mmol/l et du cholestérol total de 0,30 mmol/l (7).

Ces fibres, en augmentant la viscosité du bol alimentaire, piégeraient les acides biliaires et le cholestérol, limitant ainsi leur réabsorption (8). Par ailleurs, consommer trois portions de 90 g de céréales complètes par jour diminuerait de 32 % le risque de diabète de type 2 (9).

... et soutiendraient le microbiote intestinal

L'amidon résistant et le bêta-glucane sont digérés par les bactéries intestinales qui produisent des acides gras à chaîne courte (butyrate et propionate), une source d'énergie pour les cellules épithéliales, les aidant au maintien d'une muqueuse colique saine. Consommer des céréales anciennes riches en bêta-glucanes modifierait également la population microbienne : 3 g/jour de bêta-glucanes d'orge augmenteraient ainsi la population de *Bacteroidetes* par rapport à celle de *Firmicutes spp.* En outre, consommer des bêta-glucanes en même temps qu'une souche de *Lactobacillus* utilisée comme probiotique favoriserait la croissance de ces bactéries (8).

Certaines sont sans gluten

Les céréales anciennes sont une bonne source de protéines végétales. Le sorgho en fournit 10,4 g/100 g, le millet perlé 11,6 g. Ce taux est comparable à la teneur protéique du blé (11,8 g/100 g), mais supérieur à celle du riz (6,8 g/100 g) et du maïs (4,7 g/100 g) (3). Certaines, tels le millet et le sorgho, sont aussi sans gluten et peuvent être consommées par les personnes intolérantes ou souffrant de la maladie cœliaque. Le gluten augmenterait la perméabilité intestinale et serait responsable chez certaines personnes d'une sensibilité intestinale. ■

Sylvie Boistard
@syboistard

AURORE LAVERGNAT Diététicienne-nutritionniste à Audenge (Gironde)

Préférer également les farines complètes

Les farines anciennes sans gluten comme le millet ou le sorgho sont moins panifiables que le blé car le gluten apporte de l'élasticité à la pâte. On peut alors les marier avec une autre farine qui contient peu de gluten (et reste donc très digeste) comme celle de seigle et d'épeautre, petit ou grand. Comme pour le blé, il existe aussi différents types de farine selon leur degré de raffinage. Mais mieux vaut privilégier la complète (T130), plus riche en fibres (environ 10 g/100 g), en minéraux (magnésium, magnésium, fer, zinc, etc.) et en vitamines du groupe B.

(1) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(2) Barley phytochemicals and health promoting benefits, Raj R. et al, *J. Agric. Food Res.*, 2023.

(3) Potential Functional Implications of Pearl millet (Pennisetum glaucum) in Health and Disease, Nambiar V. S. et al, *J. Appl. Pharm. Sci.*, 2011.

(4) Phenolic Compounds in Whole Grain Sorghum and Their Health Benefits, Xu J. et al, *Foods*, 2021.

(5) Ancient wheat and health: a legend or the reality? A review on Kamut khorasan wheat, Bordoni A. et al, *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 2017.

(6) Barley: a potential cereal for producing healthy and functional foods, Geng L. et al, *Food Qual. Saf.*, 2022.

(7) Cholesterol-lowering effects of oat Beta-glucan, Whitehead A. et al, *Am. J. Clin. Nutr.*, 2014.

(8) Emerging science on benefits of whole grain oat and barley and their soluble dietary fibers for heart health, glycemic response, and gut microbiota, Tosh S. M. et al, *Nutrition Reviews*, 2020.

(9) Devrions-nous manger plus de céréales complètes ? Champ Martine, *Cahiers de nutrition et de diététique*, 2018.

LDA SACHSEN-ANHALT. KAROL SCHAUER

La femme âgée de 30 à 35 ans, dont les restes ont été retrouvés à Bad Dürrenberg, est reconstituée ici dans son costume rituel. L'analyse de son ADN a mis en évidence qu'elle avait la peau foncée, les cheveux sombres et les yeux clairs (bleus ou verts).

Chamane de Bad Dürrenberg

Les secrets d'une tombe exceptionnelle

Objet d'interrogations depuis sa découverte en 1934, une sépulture exhumée dans l'est de l'Allemagne est réexaminée depuis 2019 à l'aide des technologies les plus récentes. Hypothèse à confirmer : la femme qui y repose depuis près de 9000 ans serait une chamane.

Par Sara de Lacerda @sara_de_lacerda

En 1934, une étonnante sépulture est mise au jour dans la petite ville de Bad Dürrenberg, en Allemagne. Elle remonte au mésolithique (9600 – 5000 avant notre ère), période où les inhumations étaient des plus rares, et contient deux squelettes, un adulte et un nourrisson, entourés de nombreux artefacts et de multiples restes fauniques. Dès sa découverte, les archéologues comprennent qu'ils ont affaire à l'une des plus anciennes sépultures de la région, même s'ils se trompent en la datant du néolithique. Ils pensent aussi que le corps adulte, presque entièrement conservé, est celui d'un homme. C'est au cours des années 1960 que des examens permettront d'établir qu'il s'agit d'une femme, inhumée entre 7000 et 6800 avant notre ère. Quelle pouvait bien être son identité ? Près d'un siècle après sa découverte, cette question est aujourd'hui éclairée par de nouvelles analyses qui permettent d'affirmer que cette femme a joué un rôle exceptionnel à son époque et qu'elle est même restée dans les mémoires pendant plusieurs siècles pour ses extraordinaires pouvoirs de chamane.

Il a fallu attendre les années 1990 pour que cette hypothèse soit envisagée par une chercheuse de l'Office des monuments historiques et de l'archéologie du land de Saxe-Anhalt, Judith M. Grünberg. Son attention avait été attirée par la fantastique ramure de chevreuil incluse dans le trousseau funéraire. De telles coiffes en bois de cervidé font partie du costume des chamans sibériens et sont utilisées lors de la transe rituelle. Mais il n'est pas ▸

aisé de reconnaître sans équivoque ces intermédiaires entre le monde terrestre et celui des esprits, à la fois guides spirituels et guérisseurs. On ne connaît avec certitude que deux autres sépultures de chamans datant à peu près de la même période que celle de Bad Dürrenberg : à Horn Shelter, aux États-Unis, et à Hilazon Tachtit, en Israël.

Une forme de sépulture unique pour l'époque

Les chercheurs de l'Office des monuments historiques et de l'archéologie du land de Saxe-Anhalt cherchent depuis 2019 à valider l'hypothèse chamanique. Mais pour cela, il leur manquait certains éléments décisifs que la fouille initiale de 1934, réalisée à la va-vite, n'avait pas livrés ; ils sont donc retournés sur le terrain pour procéder à de nouvelles excavations. Le riche trousseau de la femme inhumée indique d'emblée qu'elle exerçait une fonction majeure au sein de son groupe, l'une des dernières cultures semi-nomades de chasseurs-cueilleurs qui vivaient alors dans les vastes forêts d'Europe centrale. En effet, les rares sépultures du mésolithique retrouvées en Allemagne ne comportent généralement que quelques artefacts en silex, alors que celle de Bad Dürrenberg contient une multitude d'objets — bijoux de tête et de corps, restes fauniques, artefacts en pierre, en os et en bois de cervidés *(voir l'image ci-contre)* —, signe du haut statut de cette femme. Ce statut est à présent confirmé par la configuration extrêmement élaborée de sa sépulture. Sur le terrain du parc thermal, le chef des fouilles Andreas Siegl a en effet réussi à mettre en évidence la configuration initiale de la tombe, coupée par la tranchée creusée en 1934 : « *Sa forme est unique pour cette époque,* nous dit-il. *Elle se composait d'une grande partie ovale à fond plat débouchant dans une fosse octogonale recouverte d'argile blanche, qui contenait elle-même un encastrement rectangulaire, peut-être recouvert d'un treillis d'osier enduit de crépi rose. La partie inférieure de la fosse était possiblement revêtue de bois ou éventuellement d'argile.* »

C'est dans la partie octogonale que la chamane, une femme menue âgée de 30 à 35 ans, a été enterrée en position accroupie et fortement comprimée, tenant un nourrisson âgé d'environ 6 à 8 mois contre son giron. L'âge et le sexe de l'enfant étaient jusqu'alors inconnus, mais les paléogénéticiens de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionnaire de Leipzig ont réussi à analyser son ADN, comme celui de la jeune femme, à partir du rocher (*pars petrosa*) de leur os temporal. À la surprise générale, les résultats indiquent qu'ils n'étaient « *pas étroitement apparentés* », révèle le paléogénéticien Wolfgang Haak, de l'équipe de Leipzig, « *mais plutôt au quatrième, au cinquième, ou au sixième degré. De plus, ils possèdent tous les deux le même génome mitochondrial, ce qui signifie que la parenté se situait plutôt du côté maternel de l'arbre généalogique.* »

Les nouvelles fouilles ont aussi permis de largement compléter les découvertes de 1934. « *Nous avons retrouvé plus d'un millier de nouveaux objets, dont une quantité de restes humains appartenant à la chamane et au nourrisson, plusieurs dizaines de nouveaux artefacts en silex, des dents d'animaux — dont quelques-unes sont percées —, des morceaux de coquillages et surtout des fragments d'écailles de tortue,* confie l'archéologue Holger Dietl. *Nous avons également découvert pour la première fois une minuscule espèce de gastéropode, avec des perforations intentionnelles au niveau de l'ombilic.* » De quoi étayer la thèse selon laquelle la chamane portait les ornements liés à sa fonction : plusieurs parures de dents d'animaux (sanglier, cerf, bison, auroch), en plus de la ramure de chevreuil qui la parait sans doute lors de la transe rituelle.

CONTEXTE

Période charnière entre le paléolithique et le néolithique, le mésolithique (9600–5000 avant notre ère) se caractérise par un réchauffement climatique. Dans la forêt tempérée qui remplace la steppe de l'ère glaciaire, les grands troupeaux de rennes, de chevaux sauvages et de mammouths cèdent la place à des herbivores sédentaires comme le cerf, le chevreuil et le sanglier. En Europe centrale, le mésolithique reste peu connu en raison de la rareté des sépultures.

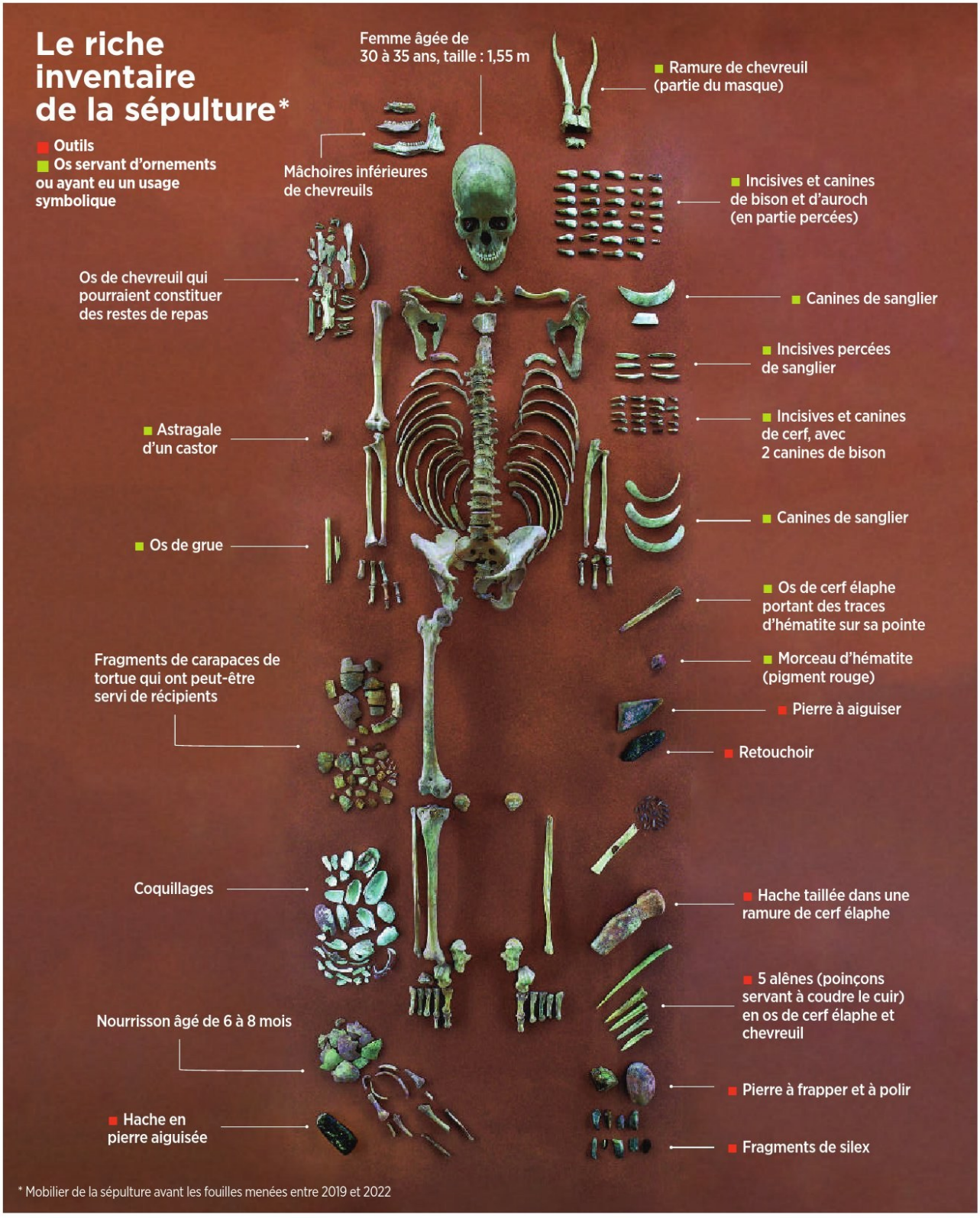
Des malformations au niveau des cervicales et du crâne

On peut d'ailleurs supposer que la chamane de Bad Dürrenberg était une spécialiste de cet état second indissociable de sa fonction, car une autre trouvaille d'importance vient renforcer les conclusions des analyses anthropologiques réalisées sur son squelette dès les années 1990. Lors des nouvelles fouilles, les archéologues ont en effet découvert sa deuxième vertèbre cervicale (axis), et ont pu constater qu'elle présentait une anomalie, tout comme sa première vertèbre (atlas) et la base de son crâne. Avec pour conséquence qu'« *une certaine position de la tête pouvait comprimer l'un des vaisseaux sanguins menant au cerveau* », explique

JÖRN DIETL

« Nous avons retrouvé plus d'un millier de nouveaux objets, dont une quantité de restes humains et plusieurs dizaines d'artefacts »

Holger Dietl, archéologue au musée de la Préhistoire de la ville de Halle (Allemagne)


Le riche inventaire de la sépulture*
Outils
Os servant d'ornements ou ayant eu un usage symbolique
Femme âgée de 30 à 35 ans, taille : 1,55 m
Mâchoires inférieures de chevreuils
Ramure de chevreuil (partie du masque)
Incisives et canines de bison et d'auroch (en partie percées)
Os de chevreuil qui pourraient constituer des restes de repas
Canines de sanglier
Incisives percées de sanglier
Astragale d'un castor
Incisives et canines de cerf, avec 2 canines de bison
Canines de sanglier
Os de grue
Os de cerf élaphe portant des traces d'hématite sur sa pointe
Fragments de carapaces de tortue qui ont peut-être servi de récipients
Morceau d'hématite (pigment rouge)
Pierre à aiguiser
Retouchoir
Coquillages
Hache taillée dans une ramure de cerf élaphe
5 alênes (poinçons servant à coudre le cuir) en os de cerf élaphe et chevreuil
Nourrisson âgé de 6 à 8 mois
Pierre à frapper et à polir
Hache en pierre aiguisée
Fragments de silex
* Mobilier de la sépulture avant les fouilles menées entre 2019 et 2022
LDA SACHSEN-ANHALT, JURAJ LIPTÁK

l'archéo-anthropologue Jörg Orschiedt de l'Université libre de Berlin. Ces malformations n'ont pas engendré de problème neurologique grave, mais ont sans doute provoqué un mouvement involontaire des yeux de haut en bas (nystagmus). La chamane pourrait même avoir été en mesure de le provoquer, estime-t-il, ce qui certainement ne devait pas manquer d'impressionner les personnes qui la voyaient dans cet état.

La sépulture serait devenue un lieu de pèlerinage

Il semblerait ainsi que les anomalies physiologiques de la jeune femme aient pu la prédisposer à sa fonction, et ce dès sa jeunesse. *« Le rôle de chaman commence souvent par une vocation involontaire, le futur chaman pouvant par exemple se révéler par un comportement remarquable »*, confirme Harald Meller, le directeur du musée de la Préhistoire de Halle, où la sépulture est conservée. Il subit ensuite des rites initiatiques, souvent douloureux. Or les incisives de la jeune femme sont limées au point d'exposer les cavités nerveuses. Des examens par tomodensitométrie ont révélé que la pulpe est complètement ouverte, raconte Jörg Orschiedt, et que des abcès se sont formés. *« Elle a dû subir de très fortes douleurs nerveuses, et même parfois des sensations de pression après la mort du nerf dentaire, mais l'inflammation ne s'est pas aggravée. La jeune femme s'est peut-être soignée elle-même en utilisant des plantes, ou elle a pu guérir grâce à son bon système immunitaire »*, suppose le chercheur.

Ces infections ne sont pas pour autant à l'origine de sa mort : selon Harald Meller, la jeune femme aurait pu décéder au cours d'une tentative de guérison. D'après les examens anthropologiques, le nourrisson qui l'accompagne n'était pas en bonne santé, des dépôts osseux indiquant qu'il souffrait de carences. *« Tout porte à croire que le nourrisson a été amené à la chamane pour qu'elle le soigne »*, analyse-t-il, supposant qu'ils aient pu mourir tous les deux au cours de cet effort particulier, explication possible de leur inhumation conjointe. Elle était certainement connue dans la région pour ses compétences de guérisseuse, comme en atteste une autre découverte majeure réalisée dans le parc thermal de Bad Dürrenberg. La mise au jour de deux masques en bois de cerf élaphe, déposés dans une autre fosse creusée à un mètre de la sépulture environ 600 ans plus tard, serait en effet le signe *« que la tombe a dû rester dans les mémoires et qu'elle est devenue un lieu de pèlerinage, car elle était d'une importance exceptionnelle »*, interprète l'archéologue Holger Dietl.

LDA SACHSEN-ANHALT, KAROL SCHAUER

Dans la tombe, la femme était comprimée en position accroupie avec un nourrisson auquel elle n'était que lointainement apparentée (vue d'artiste).

Un rôle à la fois rituel, thérapeutique et social

Les dernières recherches permettent ainsi de brosser un nouveau portrait de la frêle jeune femme. Elle s'appuyait sans doute sur certaines anomalies physiologiques pour accomplir son rôle à la fois rituel, thérapeutique et social, un rôle qui s'assimilait en réalité à celui d'un chef. Comme le rappelle Harald Meller, *« les chamans sont des intermédiaires avec le monde des esprits, des spécialistes religieux. Leurs tâches sont souvent liées à la guérison des malades, aux rites funéraires et initiatiques et aux rituels garantissant le succès de la chasse. Ils concourent au fonctionnement et à la cohésion de groupes sociaux dépendant de la chasse et ne disposent que de possibilités médicales limitées. Au mésolithique, ils ont donc souvent joué un rôle de chef. »* Pour avoir réussi à guider ses semblables dans les situations de crise et d'angoisse, la jeune chamane de Bad Dürrenberg aurait donc été implorée et vénérée pendant plusieurs siècles après sa mort. Une forme d'hommage qui a contribué à faire perdurer son pouvoir. ■

PROPAGANDE

Quand les nazis voyaient l'« Aryen » primitif

Lorsqu'elle est découverte le 4 mai 1934, la sépulture de Bad Dürrenberg, d'emblée perçue comme exceptionnelle en raison de la richesse de son mobilier, est mise au service de l'idéologie nationale-socialiste alors au pouvoir. Le préhistorien nazi Friedrich-Karl Bicker (1908–1967) décrète sans ambages que le corps adulte est celui d'un vieil homme, et même celui d'un « Aryen » primitif. Il tient à tout prix à prouver que la « civilisation aryenne » remonte à l'âge de pierre et ne trouve son origine ni en Inde, ni au Tibet, ni même autour de la Baltique — région où les théoriciens racialistes de l'époque voulaient situer les premières traces de la « race nordique » —, mais bien en plein cœur de l'Allemagne…

JOSSE/BRIDGEMAN IMAGES ; ANDREA JEMOLO / BRIDGEMAN IMAGE

Parmi les trésors de l'art carolingien, cet évangéliaire (Xe siècle) et ce calice (XIIe siècle) dits de saint Gauzelin, évêque de Toul (922-952), ornés d'or et de pierres précieuses.

L'héritage artistique révélé de l'empire carolingien

Sculpture sur ivoire, orfèvrerie, enluminure, travail du fer et du bois… Les œuvres des artistes protégés par Charlemagne et ses successeurs témoignent de la stabilité et du dynamisme d'un empire européen inédit.

La chanson nous dit que Charlemagne a « *inventé l'école* », mais celui qui fut sacré empereur en l'an 800 — le premier à porter ce titre depuis la fin de l'Empire romain d'Occident en 476 — fit bien plus que révolutionner l'éducation : il bouleversa tout un royaume dont il étendit considérablement les frontières. Charles Ier le Grand posa en effet les jalons d'un état d'esprit carolingien propice à l'érudition, à la création et à l'innovation. Les Carolingiens furent d'ailleurs à l'origine de tant de somptuosité que la période de leur règne (751-987) a pris l'appellation de « Renaissance carolingienne ». « *Au moment où cette dynastie renverse celle des Mérovingiens se joue une forme de retour à l'art antique* », explique Isabelle Bardiès-Fronty, conservatrice générale au musée de Cluny – Musée national du Moyen Âge, à Paris, et commissaire de l'exposition consacrée à cette période de l'histoire de France qui se tient jusqu'au 8 octobre à l'Hôtel département du Var, à Draguignan. « *Il s'exprime par le fait que Charlemagne se fait couronner empereur à Rome par le pape. Et cet acte politique de retour à l'idée d'Empire romain s'accompagne*

Évangiles de Saint-Thierry dits d'Hincmar, du nom de l'archevêque de Reims. Ce manuscrit du IXe siècle était utilisé pour la lecture liturgique.

En 843, l'empire carolingien est partagé au décès du fils unique de Charlemagne, Louis le Pieux, entre ses trois fils.

BIBLIOTHÈQUE MUNICIPALE DE REIMS - INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

d'un geste artistique. » Charlemagne soutient des artistes qui créent non seulement à ses côtés, dans la cité d'Aix-la-Chapelle (aujourd'hui en Allemagne) où il installe le centre de son pouvoir, mais aussi dans les hauts lieux chrétiens du royaume, comme les abbayes de Metz (Moselle), de Corbie (Somme) ou encore de Lorch (Allemagne) — où l'on peut encore admirer une rarissime porte en bois carolingienne. Ceux que l'on nomme désormais « scribes » sont installés dans des ateliers intégrés aux lieux de culte — les scriptoria —, dans lesquels ils produisent tant des textes religieux que d'éblouissants objets liturgiques faits d'or, d'argent et de pierres semi-précieuses. « *Les artistes vont faire au plus beau pour le roi et les hommes d'Église. Ils créent des œuvres qui sont aujourd'hui des trésors, des pièces d'une rareté absolue* », poursuit Isabelle Bardiès-Fronty.

Cette effervescence artistique est permise par la stabilité de l'empire carolingien, bien plus unifié que durant la période mérovingienne (481-751). Le royaume est notamment en bonne relation avec Constantinople, d'où il importe quantité de matériaux précieux comme l'ivoire, la pourpre ou encore des étoffes rares. Et même si la situation politique se tend à la mort de Louis le Pieux, seul fils de Charlemagne qui lui survit, le « goût pour le beau » carolingien ne s'en voit pour autant pas diminué, bien au contraire. En 843, au décès de Louis le Pieux, l'empire est partagé entre ses fils lors du traité du Verdun. Lothaire Ier (795-855), premier né, hérite d'une immense bande de terre verticale qui s'étend de la mer du Nord à Florence, en Italie, en passant par la Provence, la Meuse, le Rhin et le Rhône. Ses frères reçoivent des territoires s'étendant de part et d'autre de cette bande, la Francie orientale et la Francie occidentale *(voir la carte ci-dessus)*. C'est précisément dans ce royaume « *pris en sandwich comme une tranche de jambon entre deux morceaux de pain* », plaisante Isabelle Bardiès-Fronty, que les artistes carolingiens vont le plus briller. Bien longtemps après sa disparition entamée dès la mort de Lothaire en 855 (les frères de ce dernier grignotèrent progressivement son royaume), cette terre si fertile en œuvres d'art sera

ISABELLE BARDIÈS-FRONTY

« Le monde carolingien fut le témoin de nombreuses évolutions dans la culture matérielle au sens large »

Isabelle Bardiès-Fronty, conservatrice générale au musée de Cluny - Musée national du Moyen Âge, à Paris

Panneau d'ivoire sculpté représentant le pape Grégoire Ier (590-604) à qui une colombe dicte des prières. Ce chef-d'œuvre du Xe siècle ornait la reliure d'un sacramentaire.

AKG IMAGES - J.-Y. LACOTE / CARPF / ARCHÉA

Lampe à huile en verre (IXe-XIe siècle), découverte à Villiers-le-Sec (Val-d'Oise).

surnommée la Lotharingie. « *C'est sans doute l'une des raisons pour lesquelles elle fut totalement oubliée : elle ne fut nommée qu'après avoir existé, comme un rêve dont on tenterait de rattraper les lambeaux au réveil* », selon les mots de la conservatrice en chef.

Une nouvelle forme d'écriture, la minuscule caroline

Les œuvres lotharingiennes qui firent la grandeur carolingienne sont nombreuses. Il y a d'abord, et surtout, les manuscrits d'apparat, dont certains atteignent des sommets dans l'art de l'enluminure. On doit d'ailleurs à cette époque les lettres toutes en rondeur que nous utilisons encore aujourd'hui, la fameuse minuscule appelée caroline. Une écriture régulière et facilement lisible, que l'on retrouve dans des livres comme les *Évangiles de Saint-Thierry de Reims*, dits d'Hincmar (vers 845-882), les *Évangiles de Metz* (vers 845-855) ou encore les *Louanges de la Sainte Croix* de Raban Maur (vers 850).

Les artistes lotharingiens vont également maîtriser avec brio la sculpture sur ivoire — qui atteint sans doute le sommet de sa délicatesse avec la plaque de reliure figurant saint Grégoire *(voir photo ci-dessus)* —, mais aussi l'orfèvrerie, qui joue un rôle majeur dans la glorification divine. Expression par le biais des reliquaires du culte des saints, cet art incarne aussi par son faste la puissance et la richesse de ses commanditaires. On retiendra tout particulièrement le trésor de saint Gauzelin, un ensemble de pièces qui a tout du trésor de roman d'aventures chevaleresque.

L'archéologie a aussi permis de mettre au jour des objets moins « nobles », mais incontestablement plus bavards sur la vie dans le monde carolingien. « *Car ce dernier fut, là encore, le témoin de nombreuses évolutions dans la culture matérielle au sens large* », complète Isabelle Bardiès-Fronty. Ainsi peut-on mentionner cet étrier en fer et argent, nouveauté technologique de l'époque adoptée par les Francs au contact des Avars (des guerriers nomades turcs), ou encore cette très rare lampe en verre — une véritable aubaine tant ce matériau se conserve mal — trouvée sur le site carolingien de Villiers-le-Sec (Val-d'Oise). Plus révélatrices encore de « l'air de temps », ces pièces d'échecs en bois de cerf jetées dans un puits à Noyon (Oise), sans doute datées du Xe siècle, qui attestent que ce jeu venu d'Orient était déjà parvenu jusque dans les campagnes de Francie. « *On a longtemps écrit que les jeux d'échecs apparaissent au XIe ou XIIe siècle dans le monde occidental mais l'archéologie nous a montré l'inverse* », note Isabelle Bardiès-Fronty. Finalement, ces dix petits pions font aussi bien que lorsqu'il s'agit de résumer ce que fut l'ère carolingienne : une incroyable période de création et d'ouverture sur le monde qui, en plus d'annoncer l'art roman, laissera des traces dans toute l'esthétique du deuxième millénaire. ■

Marine Benoit

@marin_eben

AMAZON

Amazon teste dans 500 supermarchés des États-Unis un système de paiement par la paume de la main.

Cinq questions pour comprendre les nouveaux moyens de paiement

Sans contact, biométrie, monnaie électronique : les paiements se dématérialisent et se diversifient de plus en plus. Avec quels impacts sur nos habitudes d'achat et quels risques de fraude ?

Par Régis de Closets, avec Agence Forum News

1 Comment la crise sanitaire a-t-elle transformé nos transactions ?

Payer sans contact, faire ses courses sur Internet, envoyer des virements électroniques… En moins de deux ans, la crise du Covid a bouleversé nos manières d'acheter, de payer et même de gérer notre argent. Le paiement sans contact ne représentait que 9 % des transactions par carte en 2019, selon la Banque de France. En 2022, 61 % des achats par carte se sont faits sans code confidentiel ! Plus restreints en volume, les paiements par mobile ont triplé entre 2020 et 2021. Cette dématérialisation au galop reconfigure nos habitudes sans pour autant chasser les espèces, toujours le mode privilégié de règlement en boutique. Selon une enquête de la BCE, les Français possèdent d'ailleurs en moyenne 61 euros en liquide le matin dans leur portefeuille…

2 Le « sans contact » va-t-il révolutionner nos achats en magasin ?

Ancien directeur de la Réserve fédérale américaine, Paul Volcker (1927-2019) se désolait en 2010 que la dernière grande innovation en date du secteur bancaire soit… le distributeur automatique de billets ! Il serait heureux de voir que tout s'est accéléré depuis, grâce notamment au paiement sans contact. Après les transports publics (où il se généralise à bord), le sans contact devrait d'ici cinq à dix ans faire disparaître une grande partie des caisses en magasin. À la place, ce seront les smartphones des vendeurs qui scanneront les courses et encaisseront les paiements grâce à des logiciels dédiés, dits S-POS. Apple vient d'annoncer que tous ses appareils pourraient à terme se muer en terminaux de paiement. « *Des expérimentations de caisses nomades ont déjà lieu en France*, explique Romain Meggle, responsable du Lab Innovation by CB, (cartes bancaires. *Elles aident à juger de la fiabilité du système, mais aussi de l'acceptabilité auprès des usagers.* »

3 La biométrie remplacera-t-elle les cartes bancaires ?

Si les caisses sont appelées à disparaître, les cartes bancaires pourraient elles aussi laisser la place à de nouveaux — et étonnants — procédés d'authentification biométriques. Amazon teste ainsi dans 500 supermarchés des États-Unis un système de paiement par la paume de la main. Les clients n'ont qu'à présenter leur main, dont l'empreinte a été enregistrée, devant un lecteur pour régler leurs achats. D'autres essais sont en cours : au Brésil, Mastercard expérimente un dispositif où les clients valident leur ticket de ▶

30 % des Français disent conserver une réserve d'argent en liquide chez eux (enquête SPACE-BCE 2022). **20 % des achats** de produits de première nécessité se font en ligne (enquête SPACE BCE 2022). **33 % des montants de fraude** aux paiements en 2023 sont liés à des détournements de chèque (OSMP 2022).

Écoutez

EUROPE 1 MATIN ET *LEVEZ-VOUS DU BON PIED*

7H - 9H

DIMITRI PAVLENKO
SONIA MABROUK
GASPARD PROUST

Europe 1

CapaPictures / Europe 1

SP

AVIS D'EXPERT

JULIEN LASALLE
SECRÉTAIRE DE L'OBSERVATOIRE DE LA SÉCURITÉ DES MOYENS DE PAIEMENT

« Il faut continuer à renforcer les vigilances autour des paiements »

Votre organisation, qui rassemble les principaux acteurs du secteur, a pour mission de coordonner la lutte contre les fraudes. Quel bilan tirez-vous des efforts engagés ?
L'authentification renforcée apporte davantage de sécurité sur ces types de transaction, particulièrement pour les paiements sur Internet. Mais les fraudes contournant cette protection représentent encore un montant estimé à 342 millions d'euros en 2022. Il faut donc continuer à renforcer les vigilances : ce qui ne veut pas dire tout contrôler mais différencier les paiements avec peu de risques de ceux qui demandent une surveillance accrue. À titre d'exemple, les paiements validés par une application de paiement de mobile dans laquelle une carte vient d'être enregistrée, comportent un risque de fraude plus élevé car on a constaté des cas où le fraudeur arrive à enregistrer la carte de sa victime dans son propre mobile. C'est pourquoi il peut être utile d'être vigilant sur les paiements de ce type.

L'évolution accélérée des technologies annonce-t-elle de nouveaux défis pour la prévention des fraudes ?
Bien sûr, nous devons nous adapter en continu à la diversification des modes de paiement. Un enjeu pour les années à venir concernera les paiements automatisés à travers les objets connectés. Un certain nombre d'entre eux pourraient se faire sans la présence de l'utilisateur, comme pour les réfrigérateurs connectés. Il faudra définir des cadres spécifiques. Nous suivons également l'essor de l'informatique quantique. Nos paiements sont aujourd'hui protégés par le recours à des algorithmes de chiffrement. Certaines technologies quantiques pourraient casser ces barrières. La mise en œuvre d'algorithmes résistant au quantique est un enjeu stratégique majeur à terme. ■

Propos recueillis par R. de C.

courses par un sourire devant une caméra biométrique ! En France, le paiement par la voix a été testé l'an passé dans une station-service de l'Indre. *« Les clients effectuaient au préalable des enregistrements de leur voix de trois à cinq minutes grâce à une appli, ce qui permettait de les reconnaître quand ils parlaient à la station-service automatisée »*, détaille Romain Meggle. Ces innovations soulèvent pourtant des questions, en particulier sur la confidentialité des données collectées. Amazon fait ainsi l'objet d'une plainte depuis mars aux États-Unis sur les conditions de prélèvement et de stockage des données biométriques.

4 Les monnaies électroniques vont-elles nous servir au quotidien ?

L'ultime objectif de ces paiements dématérialisés est la monnaie elle-même. Dans le sillage des premières cryptomonnaies, les devises électroniques se multiplient, émises par des entreprises (comme Paypal qui vient de lancer le Paypal USD) ou les États eux-mêmes (à l'image du e-yuan chinois distribué à quelque 260 millions de portefeuilles électroniques de particuliers). L'essor de ces e-monnaies ouvre la voie à des transactions à moindre coût puisqu'elles s'exonéreraient de frais bancaires. Pourtant, les cas d'usage restent difficiles à entrevoir du fait de l'offre déjà importante de moyens de paiement. *« Les obstacles sont moins technologiques que réglementaires et politiques,* explique Louis Bertucci, chercheur à l'institut Louis-Bachelier, à Paris. *Certains risques associés à leur déploiement restent mal connus et difficiles à assumer (pesant potentiellement sur la stabilité financière). Le scénario le plus probable de déploiement devrait conduire ces monnaies électroniques à se spécialiser sur certains usages avec une réglementation plafonnant les dépôts et transactions associées.* »

5 À quels risques de fraude s'expose-t-on ?

La question est récurrente avec ces modes de paiement de plus en plus instantanés et dématérialisés. Pourtant, les chiffres de l'Observatoire de la sécurité des moyens de paiement le confirment : les taux de fraude restent limités, du fait de la généralisation de l'authentification renforcée (comme le 3D Secure qui valide les paiements par téléphone). Pour le « sans contact » ou les virements en ligne, le niveau de fraude ne dépasse pas 0,002 % des transactions effectuées en 2022 (et 0,149 % pour les paiements en ligne). Ce qui représente un risque limité par rapport aux fraudes aux chèques encore conséquentes (0,073 % de fraudes). Les principaux risques viennent des paiements qui échappent à cette authentification renforcée (les achats de moins de 30 euros ou certains achats hors Union européenne) ainsi que des usurpations d'identité. Les cyberpirates s'y font passer pour des tiers de confiance (banque, police…) afin de faire valider à distance des paiements frauduleux. Promulguée cet été, la loi Naegelen devrait limiter ces risques en restreignant l'emploi de numéros multiples par un même usager. De nombreux fraudeurs piratent en effet les numéros de banques pour tromper leurs cibles. ■

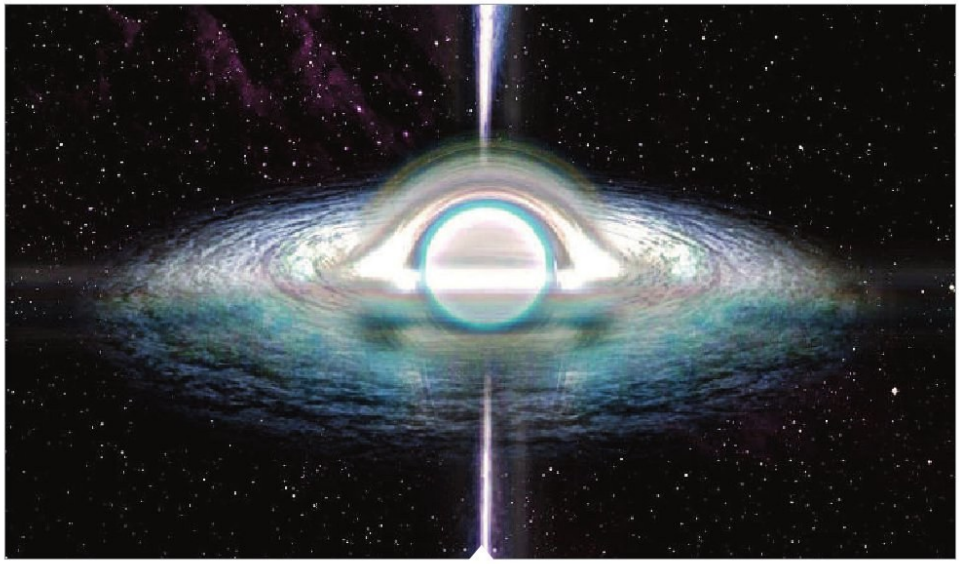
Le magazine des passionnés d'histoire

En kiosque le 28 septembre et sur www.lhistoire.fr

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Le ciel du mois p. 93
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Solutions des jeux p. 97
▶ Jeux p. 98



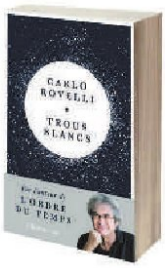
BAPEROOKAMO-CC BY-SA 4.0

À l'inverse du trou noir, le trou blanc expulserait de la matière au lieu d'en absorber (vue d'artiste).

Les trous blancs, astres de l'extrême

Le physicien Carlo Rovelli développe sa théorie audacieuse des trous blancs qui permet de combiner la relativité générale et la mécanique quantique.

THÉORIE Dans la galerie des astres étranges, les trous blancs méritent le détour. Justement, cet ouvrage nous y mène au plus près, avec comme guide Carlo Rovelli. Les trous blancs sont issus de la gravitation quantique à boucles, dont le physicien est l'un des principaux auteurs. Il s'agit d'une tentative de combiner la relativité générale et la mécanique quantique, l'un des « graal » de la physique actuelle. Une théorie de la gravitation quantique permettrait de sortir de l'impasse que constituent le Big Bang et les trous noirs. Dans les deux cas, il est impossible de décrire ce qui s'y passe car l'espace devient si petit que relativité générale et physique quantique s'y trouvent forcément mêlées.



L'idée centrale de Carlo Rovelli est que l'effondrement de l'espace-temps lors de la formation d'un trou noir cesse lorsque celui-ci atteint l'échelle de Planck, soit 10^{-35} mètre. Il se produit alors une « transition quantique » qui inverse le cours du temps. L'effondrement gravitationnel rebondit, et s'inverse. Le trou noir devient blanc, son exact opposé : il ne peut qu'expulser de l'énergie et de la matière, quand l'autre ne peut qu'en absorber.

Avec son érudition habituelle, Carlo Rovelli choisit Dante et sa *Divine Comédie* pour nous mener avec lyrisme auprès de ces astres extrêmes. Il répond à toutes les questions que pourrait se poser le lecteur, avec toujours le souci de la clarté. Seul regret à l'issue de ce livre : les trous blancs ne sont pour l'heure qu'une théorie… ■

Fabrice Nicot

Trous blancs, Carlo Rovelli, Flammarion, 176 p., 19,50 €

De l'imprimerie à la conquête spatiale

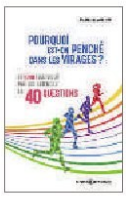
DÉCOUVERTES L'astrophysicien Jean-Marc Bonnet-Bideau déconstruit le mythe selon lequel Gutenberg serait l'inventeur de l'imprimerie, soulignant que la Chine fut pionnière en la matière. Il met en avant le rôle fondamental de l'empire du Milieu dans plusieurs

inventions ayant façonné notre monde : le papier, la poudre à canon, la boussole ou la soie. Au travers d'une narration dense et documentée, l'auteur explique pourquoi ces découvertes ont vu le jour en Chine et s'interroge : ce pays dominera-t-il les futures découvertes scientifiques ? **Ph. P.**

Les Sciences de l'Empire du milieu, Jean-Marc Bonnet-Bideau, Belin, 224 p., 26,90 €

L'activité sportive décortiquée

MATHÉMATIQUES Amandine Aftalion, spécialiste en mathématiques appliquées,



nous plonge dans les coulisses de la performance sportive. Connue pour ses travaux sur le monde quantique, c'est le sport qu'elle modélise désormais, montrant avec brio à quel point les mathématiques sont omniprésentes dans tout ce qui concerne notre activité physique, qu'il s'agisse de course à pied, de natation de jeux de balle ou de performance de haut niveau. Une exploration stimulante qui incite le lecteur à voir le sport sous un angle entièrement nouveau ! **M. de L.**

Pourquoi est-on penché dans les virages ? Amandine Aftalion, CNRS éditions, 240 p., 20 €

Éloge neuroscientifique du livre

NUMÉRIQUE Face à la place croissante qu'ont prise les écrans dans la vie des enfants — et des adultes ! — Michel Desmurget, chercheur en neurosciences cognitives au CNRS, démontre les bienfaits de la lecture sans écran pour développer le langage, la créativité, l'attention, l'empathie… avec, *in fine*, un impact considérable sur la réussite scolaire et professionnelle. L'auteur rappelle à quel point le plaisir de lire n'est pas une pratique élitiste, mais bien un *« impératif aigu de développement pour nos enfants »*. **H. J.**

Faites-les lire ! Pour en finir avec le crétin digital, Michel Desmurget, Seuil, 416 p., 20 €

Identifier les surdoués

BD Haut potentiel intellectuel, ou HPI : derrière ce sigle se cache une multitude de craintes et d'idées reçues concernant les surdoués, dont cette BD efficacement documentée et scénarisée décortique la problématique. Deux enfants

HPI et un psychologue, Nicolas Gauvrit, dans le rôle de pédagogue, cheminent avec le lecteur dans l'univers des tests de QI, de ce que l'on qualifie de types d'intelligence, à la découverte des façons d'identifier les profils de ces enfants afin de les guider au mieux. **A. De B.**

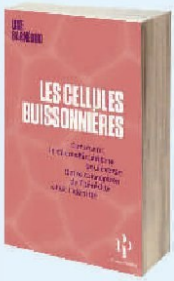
Dans la tête des HPI. Ce que nous dit la science, Nicolas Gauvrit, Jean-François Marmion, Thomas Mathieu, Les Arènes, 136 p., 20 €

Une histoire des animaux machines

TECHNIQUE Chevaux, bœufs et mules ont longtemps été *« le[s] compagnon[s] ordinaire[s] du labeur »*. Dans les manèges, attelés à un axe autour duquel ils tournaient, ils actionnaient des équipements destinés à écraser des matières (blé, argile, écorce…), lever des charges (eau, ardoises, sel…), ou encore laminer des pièces de monnaie. Point culminant de l'histoire des moteurs à force animale : la révolution industrielle du XIXe siècle. Or, soutient l'historien François Jarrige, ce phénomène a été invisibilisé. Son enquête, originale et bien documentée, répare cette anomalie. Il y détaille l'essor et le déclin, aux XIXe et XXe siècles, de l'utilisation de l'énergie animale dans les mines, les usines, les fermes… Il y fait aussi le lien avec les enjeux actuels autour de la condition animale et de la transition énergétique : *« [Les animaux] ne seraient-ils pas un élément possible dans le mix [énergétique] à inventer pour certains usages et besoins restreints ? »* Le débat est ouvert. ■

Vincent Glavieux

La Ronde des bêtes, François Jarrige, La Découverte, 450 p., 24,50 €



Quand le corps n'est pas tout à fait soi

ADN Aussi étrange que cela puisse paraître, certains d'entre nous hébergent dans leur organisme des cellules… étrangères ! C'est-à-dire dont l'ADN n'est pas le leur. Ce phénomène troublant, découvert au milieu du XXe siècle, est le microchimérisme. Un mystère biologique qui ne commence à être vraiment sondé qu'à partir des années 1990. Il donne même lieu à des situations dramatiques, tel le cas de Lydia Fairchild, accusée de ne pas être la mère de ses propres enfants. Une histoire folle qui se finit bien, lorsqu'on découvrira, dans son utérus, des cellules dont l'ADN provient de son jumeau, dont le développement s'est interrompu. Ce sujet ardu bénéficie de la pédagogie et du sens de l'image de la journaliste Lise Barnéoud, qui conduit ici une enquête riche, au contact des principaux acteurs mondiaux de ce champ de recherche insolite. ■

Hugo Jalinière

Les Cellules buissonnières, Lise Barnéoud, Premier Parallèle, 208 p., 19 €

EXPOSITIONS

Brest (29)

Plongée, contre-plongée : des sous-marins dans l'objectif
Organisées chronologiquement à partir de la Première Guerre mondiale, ces 50 photographies emmènent le visiteur dans l'univers des submersibles.
Musée national de la Marine, château de Brest, bd de la Marine, jusqu'au 10 mars 2024. Rens. : 02.98.22.12.39.

Lens (62)

Animaux fantastiques
Ces 250 œuvres, sculptures, peintures, mais aussi films de cinéma racontent l'histoire d'une faune de griffons, dragons et licornes. Un bestiaire imaginaire qui nourrit autant l'effroi que la fascination des humains.
Louvres-Lens, 99, rue Paul-Bert, jusqu'au 15 juillet 2024. Rens. : 03.21.18.62.62.

Les Eyzies (24)

Centenaire
Pour ses 100 ans, le musée propose divers événements, visites thématiques et expositions temporaires. Des photographies anciennes sont disséminées dans les galeries et de nouvelles salles sont ouvertes au public.
Musée national de préhistoire, 1, rue du Musée, jusqu'au 20 mai 2024. Rens. : 05.54.06.45.45.

Lyon (69)

Afrique, mille vies d'objets
Masques, statuettes, bijoux, textiles… 230 objets ambitionnent de familiariser le public avec l'art africain. Le contexte de leur fabrication, leurs fonctions rituelles et sociales sont complétés par des photos et des documentaires.
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 18 février 2024. Rens. : 04.28.38.12.12.

Paris (75)

Minéraux : objets de collection
Objets de science et objets d'art, matériaux industriels et source de spéculation : les minéraux alimentent une histoire complexe que retrace cette exposition. Des centaines d'échantillons ont été sortis des réserves pour l'occasion.
Musée de minéralogie de l'École des mines, 60, bd Saint-Michel, jusqu'au 9 mars 2024. Rens. : 01.40.51.91.39.

J.B. RABOUAN

Sarzeau (56) / Site historique

Château de Suscinio

Cette résidence des ducs de Bretagne remontant au début du XIIIe siècle a ouvert cet été avec un nouveau parcours scénographique. L'expérience de visite est axée sur la figure de la duchesse de Bretagne Isabeau d'Écosse, en combinant vidéo-projections et objets archéologiques ou reconstitués. Un banquet organisé en l'honneur de la duchesse Marguerite et sa fille Anne a aussi été recréé. Par ailleurs, des fouilles archéologiques menées sur place depuis 2013 continuent d'enrichir les connaissances sur le site. Les chercheurs étudient l'existence possible d'un ancien embarcadère, voire d'activités portuaires, en raison des restes d'un mur de berge devant le parvis, relié à un escalier permettant d'approcher au plus près des marais. Mais d'autres découvertes évoquent un passé plus lointain : des flèches du néolithique ou une pièce de monnaie romaine. ■ **Matéo Da Ponte**

Voir notre diaporama : sciav.fr/920suscinio

Domaine de Suscinio, route du Duc-Jean-V. Rens. : 02.97.41.91.91.

FESTIVAL

Courbevoie (92)

Atmosphères
Cinq jours lient cinéma (20 fictions et documentaires), expositions et conférences à la science et aux problématiques de développement durable. Avec pour marraine scientifique l'astrophysicienne Pauline Zarrouk. Entrée gratuite.
Centre événementiel, espace Carpeaux, Écollectif Briand, boulevard Aristide-Briand, du 11 au 15 octobre. Rens. : www.atmospheresfestival.com

PARTENARIATS

SCIENCES AVENIR

Fête de la Science
Organisé par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, l'événement convie scientifiques et médiateurs à partager avec les citoyens les résultats de la recherche et la façon dont elle s'élabore, soulevant les enjeux sociétaux des sciences et des innovations technologiques.
Du 6 au 16 octobre dans l'Hexagone, du 10 au 27 novembre à l'international et en outremer. Rens. : www.fetedelascience.fr

Cherbourg-en-Cotentin (50)

Grand Océan
2e édition de ce festival consacré à la découverte et à la préservation des trésors de la planète bleue, avec la participation d'une quarantaine de scientifiques, d'historiens et d'explorateurs.
Les 29 et 30 septembre à la Cité de la mer, le 1er octobre à Omonville-la-Rogue. Programme : www.grandocean-event.com

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

PAR JOHAN KIEKEN

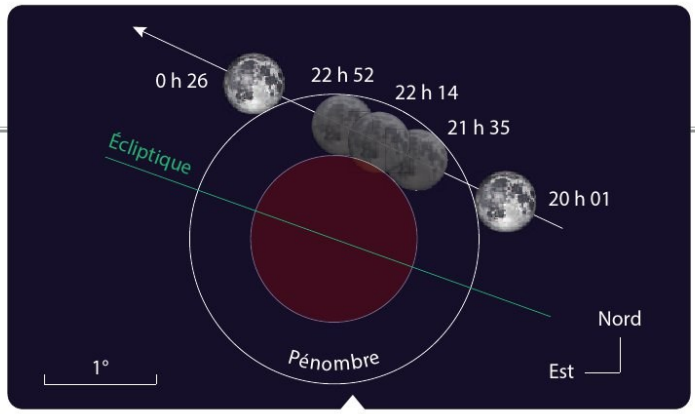
Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète est observable en tout début de mois, peu avant le lever du Soleil. Elle disparaît ensuite dans l'éclat de notre étoile et passe en conjonction supérieure le 20.

VÉNUS L'étoile du Berger atteint sa plus grande distance angulaire (46,5°) à l'ouest du Soleil le 24. Elle se trouve dans de très bonnes conditions d'observation et, par son éclat, domine largement l'horizon est en fin de nuit. Étincelante, Vénus se lève environ 4 h avant le Soleil.

MARS La planète Rouge n'est pas observable ce mois, trop proche de la direction de l'astre du jour.

JUPITER À moins d'un mois de son passage à l'opposition, Jupiter est déjà la reine de la nuit. Elle se lève en soirée et culmine à une soixantaine de degrés vers 4 h en début de mois et vers 1 h en fin de mois. Si, au cœur de la nuit, vous voyez un point très brillant haut dans le ciel, il s'agit de Jupiter !



Les phases de l'éclipse. De droite à gauche : entrée dans la pénombre, puis dans l'ombre, maximum, sortie de l'ombre puis de la pénombre.

La Terre fait un peu d'ombre à la Lune

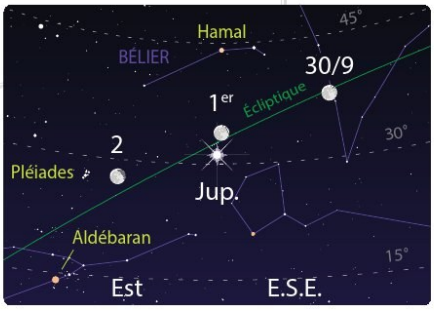
DANS LA NUIT DU SAMEDI 28 AU DIMANCHE 29, il y aura une éclipse partielle de Lune visible en France métropolitaine. Le phénomène général débutera le 28 à 20 h 01 et prendra fin le 29 à 0 h 26. Entre 21 h 35 et 22 h 52, la petite fraction du disque lunaire plongée dans l'ombre de la Terre sera nettement assombrie et présentera une teinte rougeâtre.

Notre conseil Contrairement aux éclipses de Soleil, l'observation d'une éclipse de Lune ne nécessite aucune protection particulière. Un appareil photo vous permettra d'immortaliser ce joli phénomène.

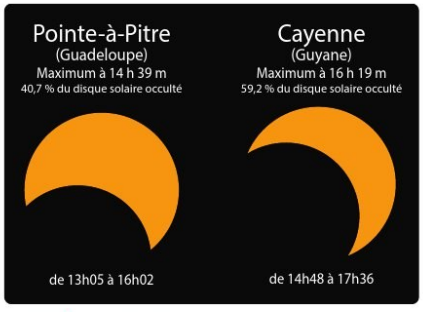
SATURNE La planète aux anneaux est visible dès la tombée de la nuit vers le sud-est, sous la forme d'un point moyennement brillant. Elle culmine en soirée à une trentaine de degrés de hauteur et passe le mois dans la constellation du Verseau.

L'appli du mois

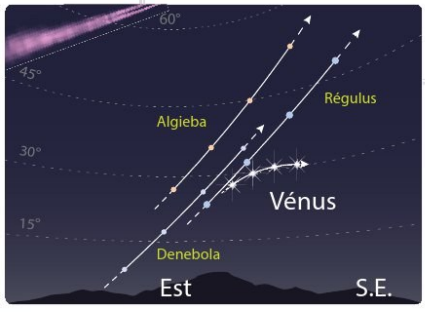
CIEL EN PÉRIL est une application participative gratuite en français pour Android. Elle vous invite à évaluer la qualité de votre ciel nocturne à partir de l'observation de quelques étoiles. Les données récoltées sont envoyées anonymement au projet international Globe at Night pour améliorer notre connaissance de la pollution lumineuse.



LE SOIR DU 1ER, VERS MINUIT, la Lune sera à moins de 3° de Jupiter. Le rapprochement prendra place dans la constellation du Bélier, deux jours à peine après la pleine lune.



L'APRÈS-MIDI DU 14, L'ÉCLIPSE ANNULAIRE DE SOLEIL qui traversera le continent américain sera visible sous la forme d'une éclipse partielle dans les Antilles et en Guyane.



TOUT CE MOIS, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, suivez Vénus et les trois étoiles les plus brillantes du Lion, dont les positions sont données les 1er, 11, 21 et 31.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel d'octobre

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

De véritables incendies sous-marins... silencieux

On a frôlé les 50 °C cet été sur les terres méditerranéennes. Images de flammes en boucle sur les chaînes d'infos, de forêts qui brûlent, de quartiers périurbains abritant souvent les populations les plus vulnérables qui s'embrasent, d'agriculteurs ruinés, de touristes et d'animaux hagards, de pompiers sidérés par la perte de collègues… Le changement climatique est visible par ces souffrances. Les canicules terrestres s'impriment par miroir dans l'océan. Jour après jour, la mer intègre la chaleur atmosphérique. Loin de nos yeux, loin de notre ressenti, l'invisibilité des vagues de chaleur marine masque un désastre silencieux. Gorgones, posidonies, coraux, etc. sont passés au chalumeau, et c'est l'ensemble des écosystèmes marins qui subit les effets du changement climatique. Il y a toujours eu des vagues de chaleur marine, mais leur récurrence et leur intensité aujourd'hui dans tous les océans du monde sont incompatibles avec résilience et adaptation. Trop vite, trop fort… Quel intérêt pour des touristes d'aller observer des cimetières de coraux blanchis, désertés par la faune marine? Quelle adaptation des communautés locales qui ont bâti aujourd'hui leur prospérité sur ce don de la nature, désormais fragilisé? La menace est grandissante sur la sécurité alimentaire de populations très dépendantes de ressources marines qui n'existent que par la biodiversité. Dans tous les océans et mers du monde, nous brûlons ces écosystèmes en émettant encore et de plus en plus des gaz à effet de serre. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

La recherche se construit sur le temps long

L'été, période sans enseignement, réunions, ni autres sollicitations, doit être assez long pour permettre (en plus des vacances) un temps libéré pour un travail choisi et non subi par les enseignants-chercheurs et les chercheurs. Les larges plages de temps non contraint permettent un travail en profondeur. Visites, conférences : avec des collègues du domaine, discuter des dernières avancées et tenter d'imaginer les prochaines. Formation : lecture d'articles choisis en fonction de ces échanges. Sinon, la recherche petit à petit devient superficielle, dans une continuation de plus en plus stérile des idées du passé. Préparation de cours ou séminaire : le renouvellement de contenu pour éviter de s'encroûter est un processus lent et exigeant. Rédaction d'article : cet été, j'ai révisé un résultat technique, et il m'a fallu m'immerger dans les concepts durant deux semaines avant qu'ils ne me semblent évidents — auparavant ils étaient opaques et peut-être incorrects ! Mise en route de nouveaux projets de recherche : phase de rumination peu compatible avec un agenda rempli. Ces efforts souterrains ne portent leurs fruits qu'à la longue : discernement de questions « importantes » ; acquisition de méthodes qui, peut-être, serviront un jour, permettant ainsi l'émergence de la « sérendipité » ; élaboration de résultats établis avec rigueur. C'est ainsi que se construit une recherche d'« excellence ». ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Filigranes et écriture sous contrainte protégeront-ils de l'IA ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

BRUNO LÉVY

Grâce à l'intelligence artificielle, des machines génèrent textes, images, vidéos ou sons à volonté. Et, ceux-ci ressemblent à s'y méprendre aux écrits, photos, tableaux, paroles, chants ou musiques de nos congénères. Pour éviter la confusion, les géants du numérique se sont engagés lors d'une réunion, tenue le 21 juillet à la Maison-Blanche en présence du président Joe Biden, à frapper les productions artificielles d'un sceau indélébile afin de les distinguer des œuvres humaines (1). À l'instar des filigranes sur les billets de banque, il indiquera sans ambiguïté leur origine. Il suffit d'insérer des informations imperceptibles à l'œil nu ou à l'écoute, mais qu'un algorithme peut détecter sans difficulté. L'usage existe depuis longtemps ; il sert à attester de l'authenticité ou de la propriété d'objets numériques. Sur les images et les sons, l'opération est rendue possible du fait de la grande redondance d'informations. Pour les textes, la tâche apparaît délicate puisque chaque mot compte ; et que les changements arbitraires sont quasiment impossibles… Il n'en demeure pas moins que des travaux actuels (2) s'inspirent de l'écriture sous contraintes pratiquée par des membres de l'Oulipo — comme Georges Perec avec son roman *La Disparition* où ne figure pas la lettre « e » — ou encore Annie Ernaux, dont le récit autobiographique *Les Années* évite le pronom personnel « je » pour cacher des messages dans les textes. Ces pratiques renouvellent l'ancienne technique de la stéganographie, à savoir la dissimulation de secrets dans les textes ou les images. Des chercheurs prétendent ainsi pouvoir fabriquer des machines qui génèrent des textes avec une distribution statistique d'unités linguistiques différente de celle que produisent naturellement les humains et facilement repérable par une machine. Comment ne pas se réjouir de ce mariage promis de la poésie et de l'IA générative, même s'il est permis de douter de son efficacité ? ■

(1) D. Bartz et K. Hu, « OpenAI, Google, others pledge to watermark AI content for safety, White House says », Reuters, 21 juillet 2023.
(2) Kirchenbauer, John, et al., « A watermark for large language models », arXiv preprint 2023.

L'ŒIL DE LASCAR

Encore un revers pour l'industrie spatiale russe. La sonde Luna-25 s'est écrasée sur le sol sélène — selon l'expression employée par Roscosmos, elle *« a cessé d'exister à la suite d'une collision avec la surface lunaire »*. C'était la première sonde spatiale lancée par la Russie vers la Lune depuis 1976 ; elle était à destination du pôle sud de notre satellite, un objectif atteint quelques jours plus tard par la mission indienne Chandrayaan-3 *(lire p. 8)*. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ÉNERGIE

Le changement d'heure affecte-t-il la consommation d'électricité ?

Maryse R.

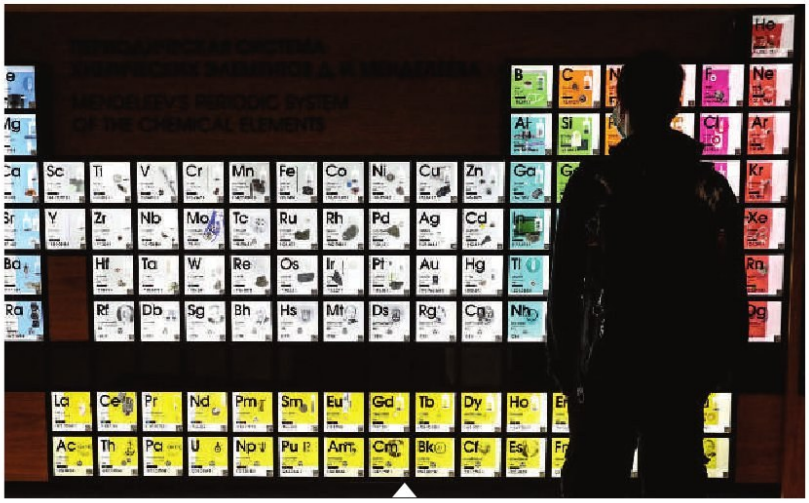
Instauré en 1976 après le choc pétrolier, le changement d'heure permettrait de faire des économies d'énergie… mais de manière plutôt modeste. En 2016, cette économie était estimée à 0,07 % de la consommation totale d'électricité en France. Mais des travaux suisses et danois publiés cette année montrent que le passage à l'heure d'été permet de réduire jusqu'à 6 % la demande en climatisation dans les immeubles de bureaux. Une économie compensée par une hausse de 4,4 % de l'énergie liée au chauffage. *« Mais comme on consomme bien plus d'énergie de refroidissement que de chauffage en été »*, le bilan est plutôt positif selon les chercheurs. ■ **L. L.**

PHYSIQUE

Combien d'arcs-en-ciel peut-on voir en même temps ?

Matthieu B.

La plupart du temps, on observe un seul arc-en-ciel, appelé arc principal, dans lequel on trouve les couleurs du spectre de la lumière blanche (du rouge à l'extérieur au violet à l'intérieur). Un deuxième arc dit secondaire apparaît parfois, avec une disposition de couleurs inversée. On aperçoit plus rarement des arcs surnuméraires, étroits et colorés (verts, violets ou orangés), qui se voient à l'intérieur de l'arc-en-ciel principal ou, plus rarement encore, à l'extérieur de l'arc secondaire.
Les plus chanceux admirent jusqu'à cinq arcs surnuméraires en une seule fois. ■ **Matéo Da Ponte**



S. FADEICHEV/TASS/SIPA USA/SIPA

Sur les 118 éléments actuels du tableau, les quatre derniers ont été ajoutés en 2016.

CHIMIE

Le tableau périodique des éléments est-il complet ?

Vincent B.

La grande force du fameux tableau périodique de Mendeleïev (du nom du scientifique russe qui l'a mis au point au XIXe siècle), dans lequel sont classés les éléments chimiques en fonction de leurs propriétés, est de laisser place à la possibilité de découvrir de nouveaux éléments, et même de prévoir leurs caractéristiques. Il y a actuellement 118 éléments dans ce tableau. Le dernier ajout remonte à 2016, avec l'ununtrium (113), l'ununpentium (115), l'ununseptium (117) et l'ununoctium (118). Quatre éléments produits dans des accélérateurs de particules, qui achèvent de remplir la septième ligne du tableau. Mais la tâche se complexifie avec les futurs éléments 119 et 120 (provisoirement nommés ununennium et unbinilium) que les chercheurs tentent désormais de produire, sans succès jusque-là. En effet, la durée de vie de ces éléments est si courte — quelques millisecondes tout au plus — que réaliser les réactions chimiques permettant de les caractériser est un casse-tête. *« Les calculs suggèrent qu'ils viendront inaugurer une huitième ligne dans le tableau »*, affirmait en 2019 le physicien nucléaire russe Iouri Oganessian, le plus prolifique des découvreurs d'éléments dits superlourds (ceux dont le numéro atomique dépasse 104). Et que se passera-t-il si, un jour, 121 ou 122 font leur apparition ? *« Ce serait probablement la fin de la classification telle qu'on la connaît, car il est fort possible qu'avec eux, la périodicité des propriétés chimiques disparaisse. Mais parviendra-t-on à déterminer ces propriétés ? Personne ne le sait »*, jugeait le physicien russe. ■ **Lise Loumé** @Lise_Loume

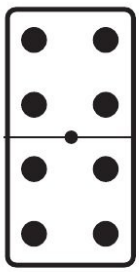
Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 919, septembre 2023

Anagramme

On ne fait pas d'omelette sans casser des œufs.

Domino en défaut

Le produit des nombres de chaque domino égale le carré de 0, 1, 2, 3 et 5. Il manque le carré de 4, donc le domino est :



Logique de lettres

B et Z de la colonne 1 doivent être échangés : l'alphabet se lit en colonnes de 2 en 2, d'abord en croissant de A jusqu'à M puis en décroissant et en chemin inverse de O à Z.

Auteurs, autrices ?

L'ensemble des lettres rouges donne Colette qui a écrit la première phrase et Sénèque qui a écrit la seconde.

Matoku

4- 3	7	21+ 6	8	S 5	2	4	1
20x 4	5	2	1	23+ 7	6	3	20+ 8
6M 6	8	22+ 7	4	1	5	2	3
8	2	4	5	6	3	1	7
19+ 1	6	168x 3	7	2	4	8 8	5M 5
2	1	37+ 5	3	8	7	6	4
5	3	1	6	S 4	8	7	2
19+ 7	4	8	2	3	1	5	6

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 911
Les origines de la vie

N° 912 Climat : inverser le réchauffement, c'est possible

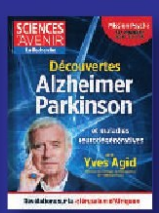
N° 913 Fusion nucléaire : une révolution pour l'humanité

N° 914
Les clés du contrôle de soi

N° 915
Les solutions pour produire son énergie

N° 916 James-Webb : une nouvelle histoire de l'Univers

N° 917/918
Spécial Eau



N° 919 Découvertes sur Parkinson et Alzheimer

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 911 ❑ N° 912 ❑ N° 913 ❑ N° 914
❑ N° 915 ❑ N° 916 ❑ N° 917/918 ❑ N° 919

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Les intrus

Dans chacune de ces séries, il y a un intrus.

1 ▸ SIX DIX MIL

2 ▸ VII IX XIII

3 ▸ 140 CXL 8D

4 ▸ BAC BEC BIC

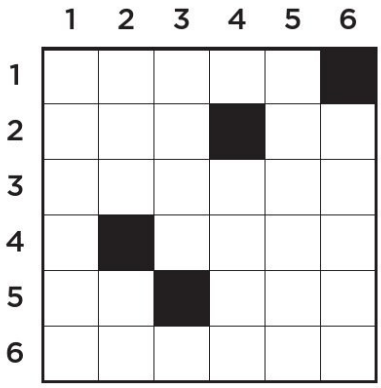
5 ▸ CLIM CLIC MIDI

6 ▸ BEC FAC CAB

Échec au lion

Relisez cette fable de La Fontaine en suivant les rectangles selon un parcours de cavalier d'échecs. Rappelons que ce cavalier saute à chaque déplacement selon la diagonale d'un rectangle 2 x 3.

ENTR	TAITE	URDI	ETTE	TITDET
ELER	OCCA	ERREA	QUILE	LETO
AVIE	ELESP	TLUID	ATSOR	UXENC
SION	OIDES	DUNLI	SSEZA	RACE
ATTES	ONNAL	MONT	ANIMA	ONUNR



Nombres croisés

Horizontalement : **1.** Prénom masculin. **2.** Bon départ pour Corneille - Jeu. **3.** 0270 en base 3. **4.** Entendu avant d'attaquer le morceau. **5.** Le département homonyme - Mesure qui se bat à 4 temps. **6.** Format.

Verticalement : **1.** Le 4 germinal an X en grégorien. **2.** Pour appeler le Canada - Nombre qui parle à certains sportifs. **3.** Un nombre de pattes pour les jeunes cinéphiles. **4.** Une aide pour défiler. **5.** Le 61e jour de l'année de la crise. **6.** Un multiple de 437 moins 1.

Insomnie carrée

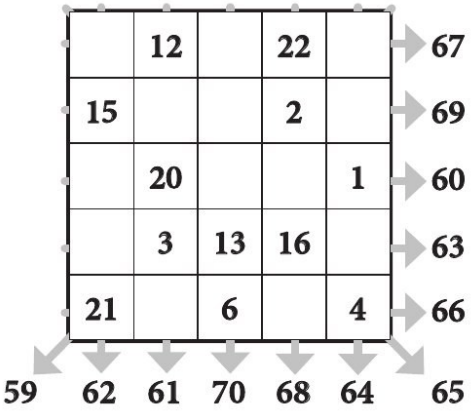
Si chaque lettre est remplacée par son bon chiffre, l'opération est correcte.

```
    T S E
×   T S E
-------
E N D O R T
```

Une magie très séquentielle

Rien n'est parfait, même dans le domaine des jeux mathématiques. Ici, les sommes des lignes horizontales, verticales et diagonales sont toutes différentes mais ne se suivent pas sur le pourtour (de 59 à 70).

Saurez-vous néanmoins compléter ce carré en cases toutes différentes ?



Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

Découvrez une collection
D'ESPRESSOS GOURMANDS

DES ESPRESSOS DOUX AUX SAVEURS VANILLE, CARAMEL ET CHOCOLAT

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE. 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EUROS.

En matière de gestion de patrimoine, c'est l'humain qui est capital

Chez Allianz, 1 200 conseillers experts en gestion de patrimoine sont à vos côtés partout en France pour vous accompagner et vous aider à préparer votre futur avec des solutions épargne, retraite et transmission adaptées.

Pour plus d'informations et prendre rendez-vous avec le conseiller le plus proche de chez vous, rendez-vous sur allianz.fr ou flashez ce QR Code.

Contacter un conseiller

Avec vous de A à Z

Allianz Vie - Entreprise régie par le Code des assurances - S.A. au capital de 643 054 425 € - 340 234 962 R.C.S. Nanterre. Siège social : 1, cours Michelet - CS 30051 - 92076 Paris La Défense Cedex. Document à caractère publicitaire.